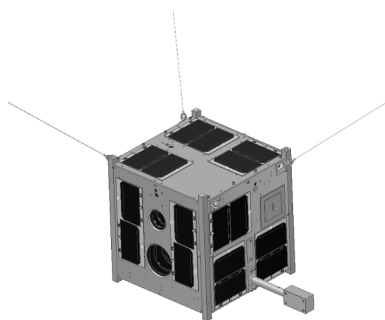


Misja BRITE

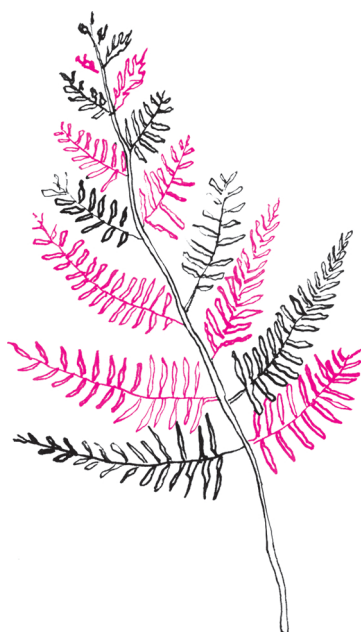
Radostaw SMOLEC*



Schemat satelity Lem.
Źródło: Centrum Badań Kosmicznych.

Parametry orbity satelitów BRITE:	
okres obiegu	99,5 min
średnia wysokość	736,6 km
wysokość w perygeum	589,9 km
wysokość w apogeum	883,3 km
mimośród orbity	0,0206
nachylenie orbity	97,8°

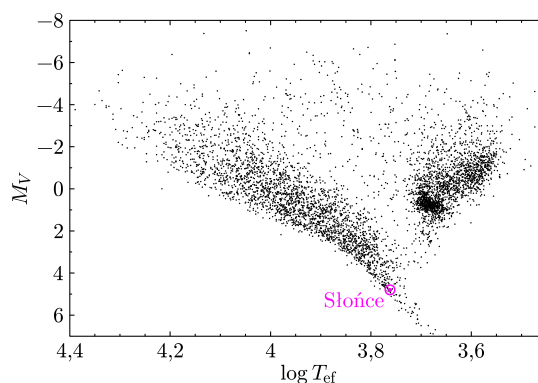
Pole widzenia Lema to aż 24°. Z łatwością pomieści całą konstelację Oriona, której najjaśniejsze gwiazdy są pierwszymi celami misji.



21 listopada 2013 roku rakieta nośna Dniepr umieściła na orbicie satelitę Lem. Jest to drugi polski satelita (pierwszym jest wystrzelony na początku 2012 roku PW-Sat) i pierwszy polski satelita naukowy. Lem dołączył do dwóch bliźniaczo podobnych austriackich satelitów znajdujących się na orbicie od lutego 2013 roku. Wkrótce dołączy do nich kolejny polski satelita Heweliusz oraz dwa kanadyjskie. Sześć bliźniaczych satelitów będzie realizować wspólny program badawczy, którego istota kryje się w akronimie BRITE – **BR**Ight **T**arget **E**xplorer – będą badały najjaśniejsze gwiazdy.

Lem należy do klasy nanosatelitów. Jest kostką o boku 20 cm ważącą niespełna 7 kg. Satelita został złożony w Centrum Badań Kosmicznych w Warszawie według projektu kanadyjskiego. Heweliusz, już gotowy do startu, zawiera więcej podzespołów polskiej konstrukcji, między innymi nieco zmodyfikowany teleskop. Warto podkreślić, że pomysłodawcą misji BRITE jest Polak, Sławomir Ruciński, astrofizyk od wielu lat pracujący w Kanadzie. Komunikacja z satelitą realizowana jest przez centrum kontroli lotu w Centrum Astronomicznym im. M. Kopernika w Warszawie.

Podstawowym narzędziem naukowym Lema jest teleskop o średnicy obiektywu zaledwie 3 cm, zaopatrzonego w filtr o barwie niebieskiej (obserwacje w zakresie 390–460 nm) oraz detektor CCD. Sprzęt, który pewnie wzbudziłby uśmiech politowania niejednego amatora obserwacji nocnego nieba, na orbicie ziemskiej staje się niezwykle cennym instrumentem. W obserwacjach naziemnych największym utrudnieniem są turbulencje powietrza, prowadzące do nieustannych zmian jasności i pozycji gwiazdy (tzw. migotanie gwiazd). Na orbicie problem nie istnieje i możliwe są precyzyjne pomiary jasności gwiazd (fotometria). Co ważne, będzie to fotometria dwubarwna, gdyż trzy satelity wyposażone są w filtr niebieski, a trzy w filtr czerwony (550–700 nm). Tak niewielki teleskop pozwoli na precyzyjne obserwacje jedynie najjaśniejszych gwiazd, jaśniejszych od około 4 mag. Jest ich mniej więcej 600. Możliwe też będą mniej precyzyjne obserwacje słabszych gwiazd do około 7 mag.



Gwiazdy BRITE na diagramie HR. Dane: Hipparcos/A. Pigulski

Co interesującego jest w tych kilkuset gwiazdach, które bez trudu dostrzegamy okiem nieuzbrojonym? Powyższy rysunek ilustruje położenie tych gwiazd na teoretycznym diagramie Hertzsprunga-Russella (HR), wykresie jasności absolutnej M_V w zależności od temperatury efektywnej T_{ef} w kelwinach. Na diagramie dostrzegamy dwa wyraźne zgrupowania. Wzdłuż przekątnej wykresu przebiega ciąg główny grupujący gwiazdy, w centrum których zachodzą reakcje jądrowe prowadzące do przemiany wodoru w hel (palenie wodoru). W zdecydowanej większości są to gwiazdy jaśniejsze od Słońca, a co za tym idzie, bardziej masywne (na ciągu głównym obowiązuje przybliżona zależność $M \sim L^{3,5}$, gdzie L to moc promieniowania). Druga grupa gwiazd (prawa część wykresu) to równie jasne, choć chłodniejsze czerwone olbrzymy palące hel w jądrze oraz ich ewolucyjne następczynie, gwiazdy asymptotycznej gałęzi olbrzymów (gwiazdy AGB), które po wyczerpaniu helu w centrum palą go w powłoce otaczającej węglowo-tlenowe jądro.

*Centrum Astronomiczne im. Mikołaja Kopernika w Warszawie



Rozwiązanie zadania M 1425.
Pokażemy, że nie istnieje żądane kolorowanie liczb całkowitych, więc w szczególności nie da się pokolorować liczb rzeczywistych. (Jest to bardzo szczególny przypadek twierdzenia van der Waerdena o kolorowaniu.)

Załóżmy, że pokolorowaliśmy liczby całkowite nieujemne i liczba 6 jest biała. Jedną z liczb 8, 10, 12 też musi być biała. Nazwijmy ją x . Wówczas liczby $2x - 6$ i $2 \cdot 6 - x$ muszą być czarne. Zatem ich średnia $3 + x/2$ musi być biała. Dostaliśmy więc trzy białe liczby $6, x, 3 + x/2$, co daje sprzeczność.



Gwiazdy AGB odpowiadają za wyprodukowanie niemal połowy węgla obecnego we Wszechświecie. Wyprodukowały też bogate w neutrony ciężkie pierwiastki, takie jak kadm czy ołów.



Oscylacje gwiazd są albo wymuszone przez turbulentne ruchy konwektywne w warstwach zewnętrznych (jak w dzwonku na wietrze), albo są samowzbudzone, gdy gwiazda pracuje jak silnik cieplny, magazynując ciepło w fazie maksymalnej kompresji.

Mod identyfikują trzy liczby: n – liczba powierzchni węzłowych wzdłuż promienia gwiazdy, l (stopień modu) – liczba linii węzłowych na powierzchni oraz m (rzęd modu) – liczba linii węzłowych przecinających równik. Powierzchnie i linie węzłowe składają się z punktów, w których amplituda fali stojącej jest równa zero.

Żeby zrozumieć ogromne znaczenie najjaśniejszych gwiazd, musimy cofnąć się w czasie o 13 miliardów lat, do początków Wszechświata. Według modelu standardowego w pierwszych minutach po Wielkim Wybuchu nastąpiła pierwotna nukleosynteza, w wyniku której powstały jądra helu i śladowe ilości najlżejszych pierwiastków. Ani śladu węgla, tlenu, krzemu, żelaza czy innych cięższych pierwiastków (astronomicznych „metali”), budujących Ziemię, nas czy przedmioty, które nas otaczają. Wszystkie cięższe pierwiastki powstały w gwiazdach, w wyniku zachodzących kolejno procesów syntezy lżejszych pierwiastków w cięższe.

W gwiazdach masywnych ($M \gtrsim 8M_{\odot}$) procesy syntezy prowadzą do wytworzenia żelaznego jądra. Palenie żelaza wymaga dostarczenia energii z zewnątrz. Ciśnienie promieniowania i gazu w pozbawionej źródła energii jądrowej gwiazdzie nie jest w stanie zrównoważyć grawitacji. Następuje spadek materii na jądro gwiazdy, a następnie odrzucenie jej części w potężnym wybuchu. W trakcie takiej eksplozji supernowej powstają pierwiastki cięższe od żelaza. Eksplozja rozprasza je w przestrzeni razem z produktami gwiazdnej nukleosyntezy oraz inicjuje procesy gwiazdotwórcze w okolicznych, wzbogaconych w metale, obłokach materii międzygwiazdowej.

Żyjemy dzięki najmasywniejszym i najjaśniejszym gwiazdom. Im większa jasność gwiazdy, tym szybciej ona ewoluje. By wypalić centralne zapasy wodoru, gwiazda o masie Słońca potrzebuje 10 miliardów lat. Gwiazda dziesięciokrotnie masywniejsza potrzebuje na to zaledwie kilkunastu milionów lat. Od początku Wszechświata dziesiątki generacji najjaśniejszych i najmasywniejszych gwiazd pracowały, by wytworzyć materię budującą Układ Słoneczny.

Gwiazdy mniej masywne po opuszczeniu ciągu głównego i wypaleniu helu w centrum stają się gwiazdami AGB. Choć nigdy nie wybuchną jako supernowe, odgrywają równie ważną rolę we wzbogacaniu materii międzygwiazdowej w metale. Ciężkie pierwiastki powstają w nich w wyniku *procesu s* – wychwytu przez jądra atomów powolnych neutronów, które następnie przemieniają się w protony w wyniku rozpadu β^- . W zewnętrznych warstwach gwiazd AGB powstaje też pył pełniący ważną rolę w chłodzeniu ośrodka międzygwiazdowego – kluczowym procesie umożliwiającym jego fragmentację i tworzenie nowych gwiazd. Zewnętrzne warstwy gwiazd AGB są rozdmuchiwane przez silny wiatr gwiazdowy, a pod koniec życia odrzucane w przestrzeń jako piękna, lecz krótkotrwała mgławica planetarna.

Gwiazdy obserwowane przez BRITE, czyli masywne gwiazdy ciągu głównego oraz chłodne olbrzymy, są więc niezwykle ważne. Dominują one ekologię Wszechświata, są kluczowe w zrozumieniu obiegu materii w kosmosie. Tymczasem nasza wiedza o tych gwiazdach jest ciągle niepełna. Wynika to z niedoskonałości teorii budowy i ewolucji gwiazd, w szczególności niepewności w opisie konwekcji, mieszania materii wewnątrz gwiazd czy ich rotacji. Zbadanie tych procesów wymaga zajrzenia do wnętrza gwiazd, co potrafimy już zrobić! Podobnie jak sejsmologia pozwala nam poznać strukturę wnętrza Ziemi dzięki badaniu rozchodzenia się fal sejsmicznych, tak asterosejsmologia pozwala na zbadanie wnętrza gwiazd dzięki rozchodzącym się w nich falom dźwiękowym – oscylacjom gwiazd prowadzącym m.in. do zmian jasności.

O asterosejsmologii pisaliśmy obszernie w *Delcie* 6/2009, teraz jedynie krótkie przypomnienie. Oscylacje gwiazdy, przejawiające się zmianami jej kształtu, jasności i temperatury, mogą zachodzić w wielu różnych modach równocześnie. Geometrię modu określa liczba powierzchni węzłowych wewnątrz gwiazdy i liczba linii węzłowych na jej powierzchni (stopień modu). Częstotliwość modu określają warunki panujące wewnątrz gwiazdy wzdłuż trajektorii rozchodzenia się fali. Im niższy stopień modu, tym głębiej mod ten penetruje wnętrze gwiazdy. Konstruując model sejsmiczny gwiazdy, czyli próbując odtworzyć częstotliwości modów obserwowanych w danej gwiazdzie za pomocą modeli teoretycznych, badamy strukturę wewnętrzną gwiazdy oraz testujemy poprawność naszych modeli. Jest to istota asterosejsmologii.

By skonstruować dobry i wartościowy model sejsmiczny, mówiący nam jak najwięcej o gwiazdzie, potrzebujemy dobrych obserwacji: jak największej liczby modów, precyzyjnego zmierzenia ich częstotliwości i ich zidentyfikowania, czyli

Częstotliwość modu dla sferycznej nierotującej gwiazdy zależy tylko od n i ℓ , nie zależy zaś od m . Rotacja znosi tę degenerację, rozszczepiając częstotliwość modu na $2\ell + 1$ składników. Badając rozszczepienie dla modów o różnym ℓ , badamy profil rotacji wewnątrz gwiazdy.



określenia geometrii (np. stopni modów). Częstotliwość można określić bardzo dokładnie, dysponując precyzyzną i pozbawioną przerw fotometrią. Regularnie powtarzające się przerwy w obserwacjach, trudne do uniknięcia w obserwacjach naziemnych (dzień!), prowadzą do aliasów – dodatkowych częstotliwości w widmie oscylacji, nieodpowiadających rzeczywistym zmianom, a wynikających ze sposobu próbkowania sygnału. Konstelacja satelitów BRITE pokazuje tu swoją siłę. Choć jeden satelita będzie mógł obserwować daną gwiazdę jedynie przez około 15 do 40 minut w ciągu trwającego 100 minut obiegu Ziemi, to równoczesna obserwacja obiektu przez kilka satelitów konstelacji zmniejszy problem aliasów. Obserwacje tej samej gwiazdy, trwające nieprzerwanie nawet do 90 dni, pozwolą na detekcję wielu modów, także o małych amplitudach zmian jasności (na poziomie mmag). Dużo trudniejszy jest problem identyfikacji modów – niezbędnej do poprawnego porównania mierzonych częstotliwości z wyliczonymi z modelu teoretycznego. Ułatwi to fotometria wielobarwna, gdyż stosunki amplitud i różnice fazy oscylacji w dwóch różnych zakresach długości fal są charakterystyczne dla danego modu oscylacji. Tę metodę opracowali i rozwinęli polscy astrofizycy, m.in. Jadwiga Daszyńska-Daszkiewicz, Wojciech Dziembowski i Aleksiej Pamiatnych. Duża jasność obserwowanych gwiazd pozwoli z kolei na łatwe i szybkie uzyskanie widm promieniowania tych gwiazd za pomocą łatwo dostępnych, dwu-, trzymetrowych teleskopów naziemnych. Obserwacje spektroskopowe pozwalają zmierzyć prędkość radialną powierzchni gwiazdy, pomocną w identyfikacji modów oraz dającą nam pełniejszy obraz pulsacji. Dodatkowo analiza widma promieniowania pozwala na umiejscowienie obserwowanej gwiazdy na teoretycznym diagramie HR, co jest istotnym ograniczeniem przy konstruowaniu modelu sejsmicznego.

Oscylacje nie są jedynym procesem prowadzącym do zmian jasności gwiazd. Silne wiatry gwiazdowe i wyrzuty materii z powierzchni, charakterystyczne dla najjaśniejszych gwiazd, również prowadzą do zmian jasności, podobnie jak niejednorodności powierzchni (plamy) połączone z rotacją. Mamy nadzieję, że BRITE znacząco przyczyni się do lepszego zrozumienia tych interesujących procesów. Choć podobne badania wykonywały już potężne (i wieloletnie) teleskopy kosmiczne CoRoT i Kepler, to najjaśniejsze gwiazdy były poza ich zasięgiem, ponieważ ich światło zbierane z dużej powierzchni zwierciadła błyskawicznie wysyca detektory CCD. BRITE, choć niewielki, pozwoli nam zgłębić tajemnice tych niezwykle ważnych gwiazd.



Rozwiązanie zadania F 857.

W następstwie zjawiska fotoelektrycznego na kulce zbiera się ładunek dodatni, który wytwarza pole hamujące fotoelekty. Wielkość potencjału kulki ϕ można wyrazić poprzez jej ładunek q zależnością $q = C\phi$, gdzie $C = 4\pi\epsilon_0 r$ jest pojemnością kulki. Maksymalny potencjał kulki ϕ_{\max} zależy od początkowej energii kinetycznej elektronów. Ponieważ zmiana energii kinetycznej elektronów jest równa pracy sił pola wytwarzanego przez kulkę, to przyjmując, że w nieskończoności potencjał pola kulki i prędkość elektronu wynoszą zero i uwzględniając fakt, że ładunek elektronu jest ujemny, można napisać:

$$\Delta W_{\text{kin}} = -e\phi_{\max},$$

czyli

$$(1) \quad -\frac{mv_{\max}^2}{2} = -e\phi_{\max} \text{ i } \phi_{\max} = \frac{mv_{\max}^2}{2e}.$$

Ze wzoru Einsteina dla zjawiska fotoelektrycznego mamy

$$(2) \quad \frac{mv_{\max}^2}{2} = h\nu - A,$$

gdzie h to stała Plancka, ν – częstość światła. Podstawiając (2) do (1), dostajemy

$$\phi_{\max} = \frac{h\nu - A}{e} = \frac{hc/\lambda - A}{e}.$$

W naszym przypadku

$$\phi_{\max} \approx 4,4 \text{ V}.$$



Rozwiązanie zadania F 858.

Dopóki wyłącznik jest zamknięty przez opór R_3 i cewkę, płynie prąd

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R_3}$$

(przez opory R_1 i R_2 prąd nie płynie, bo spadek napięcia na cewce jest równy zeru). Po otwarciu wyłącznika energia elektryczna zgromadzona w cewce wydzieli się w postaci ciepła

$$Q = \frac{LI^2}{2} = \frac{L\mathcal{E}^2}{2R_3^2}$$

na oporach R_1 i R_2 (przez opór R_3 prąd nie płynie).

Opory R_1 i R_2 są połączone równolegle, więc spadki napięcia na nich są równe $I_1 R_1 = I_2 R_2 = U$. Ilość ciepła, jaka wydzieli się w każdym z nich w ciągu krótkiego czasu Δt , będzie równa odpowiednio

$$Q_1 = \frac{U^2}{R_1} \Delta t \quad \text{ i } \quad Q_2 = \frac{U^2}{R_2} \Delta t,$$

stąd $Q_1 R_1 = Q_2 R_2$. Równocześnie $Q = Q_1 + Q_2$. Ostatecznie więc

$$Q_1 = \frac{Q}{1 + R_1/R_2} = \frac{L\mathcal{E}^2}{2R_3^2(1 + R_1/R_2)}.$$

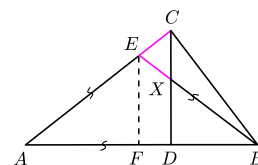
Podstawiając z warunków zadania $R_1 = R_3 = R$, $R_2 = 2R$, otrzymujemy ostatecznie:

$$Q_1 = \frac{L\mathcal{E}^2}{3R^2}.$$



Rozwiązanie zadania M 1423.

Przyjmijmy, że $AD = AE = EB = 1$ i oznaczmy punkt przecięcia odcinków CD i BE przez X . Niech F będzie rzutem prostokątnym punktu E na odcinek AB .



Zauważmy, że $\sphericalangle ECX = 90^\circ - \sphericalangle CAD = 90^\circ - \sphericalangle ABE = \sphericalangle DXB = \sphericalangle EXC$. W takim razie trójkąt CXE jest równoramienny, oznaczmy $EC = EX = x$. Z twierdzenia Pitagorasa mamy

$$BC = \sqrt{1 - x^2}$$

oraz

$$AB = \sqrt{(1+x)^2 + (1-x)^2} = \sqrt{2(1+x)}.$$

Z twierdzenia Talesa mamy więc

$$1+x = \frac{CA}{EA} = \frac{DA}{FA} = \frac{1}{\frac{1}{2}\sqrt{2(1+x)}},$$

skąd $1+x = \sqrt[3]{2}$. Zatem

$$AC/AD = 1+x = \sqrt[3]{2}.$$