

Dokąd sięga Układ Słoneczny?

Heliosfera i jej granice

Justyna M. Sokół

Dzięki rozwojowi nauki w ostatnich kilkudziesięciu latach możemy dziś oglądać przestrzeń kosmiczną nie tylko w zakresie widzialnym, ale również poprzez promieniowanie radiowe, mikrofalowe, rentgenowskie czy ultrafioletowe. Jednak w żadnym z tych zakresów nie jesteśmy w stanie dojrzeć granic najbliższego nam świata, czyli miejsc, gdzie materia pochodząca ze Słońca spotyka się z materią międzygwiezdową.

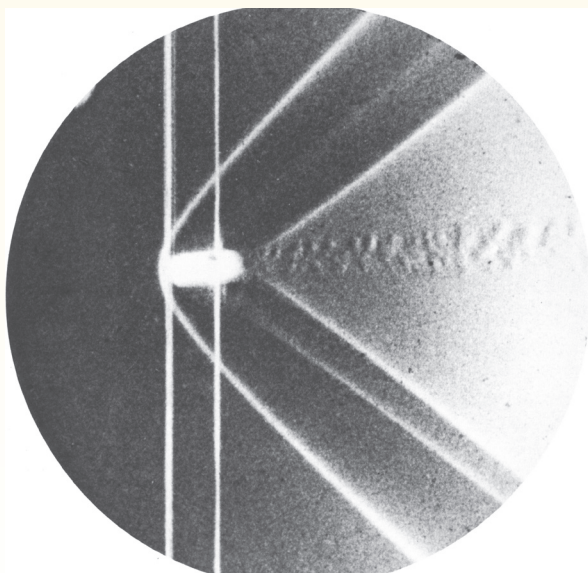
Patrząc na mieniące się na niebie kolorowe wstęgi zorzy polarnej, widzimy pośrednio materię pochodzącą ze Słońca. Oznacza to, że przestrzeń międzyplanetarna nie jest pusta, lecz wypełniona m.in. plazmą pochodzenia słonecznego. Plazma ta, będąca strumieniami protonów, elektronów i dodatnich jonów stale wypływających z korony Słońca, to wiatr słoneczny. Całkowicie wypełniając Układ Słoneczny, przemierza on przestrzeń kosmiczną, sięgając daleko poza orbitę Neptuna.

Typowa prędkość wiatru słonecznego w płaszczyźnie ekliptyki wynosi około 450 km/s. Tymczasem prędkość dźwięku dla plazmy z korony słonecznej o temperaturze 10^6 K wynosi około 120 km/s (jest to wielkość zależna od temperatury ośrodka; ogólnie im niższa temperatura, tym mniejsza prędkość dźwięku). Wiatr słoneczny porusza się więc z prędkościami naddźwiękowymi. Jeszcze szybciej niż typowy wiatr słoneczny porusza się materia odpowie-

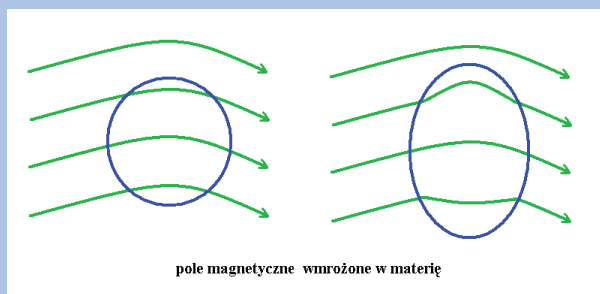
dzialna za powstawanie zórz polarnych. Powstają one wskutek wnikania w głąb ziemskiej magnetosfery cząstek o dużej energii, pochodzących z wybuchów na powierzchni Słońca i koronalnych wyrzutów materii (CME — ang. coronal mass ejection). Są to jednak zjawiska sezonowe, zwykle towarzyszące maksimum aktywności słonecznej. Wiatr słoneczny, w przeciwieństwie do materii powodującej zjawisko zórz polarnych, to stały wypływ plazmy ze Słońca, tworzący w przestrzeni ochronny pęcherz, zwany heliosferą, chroniący nas (Ziemię) i cały Układ Słoneczny przed szkodliwym promieniowaniem kosmicznym.

Budowa heliosfery

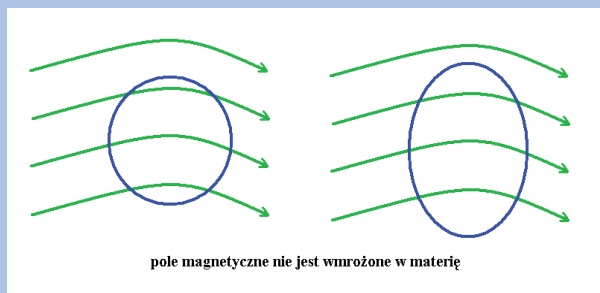
Oprócz wiatru słonecznego, za kształtowanie heliosfery odpowiedzialna jest materia międzygwiezdowa, w której Słońce jest zanurzone. Nie jest ona ani jednorodnie rozłożona, ani stacjonarna. Zarówno Słońce, jak i otaczający je gaz, pobliskie gwiazdy i materia międzygwiezdowa krążą wokół centrum Galaktyki po podobnych, choć nie identycznych orbitach. Ruch względny Słońca i Lokalnego Obłoku Międzygwiezdnego daje dla obserwatora związanego ze Słońcem efekt napływu materii międzygwiezdowej na Słońce z pewnego kierunku.



Rys. 1. Fala uderzeniowa w praktyce. Fotografia pocisku w czasie lotu, na której jest widoczna struktura fali uderzeniowej. Fot. Ernst Mach, rok 1888



pole magnetyczne włożone w materię

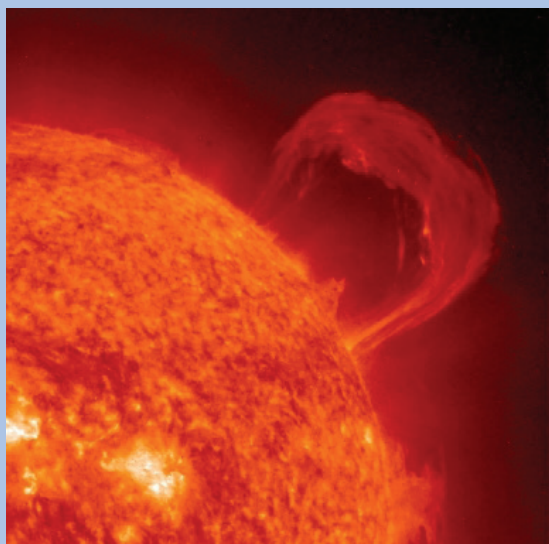


pole magnetyczne nie jest włożone w materię

Wszyscy widzieliśmy, jak opyłki żelaza rozsypane wokół magnesu układają się wzdłuż linii sił pola magnetycznego. Wstrząśnięte, natychmiast posłusznie odtwarzają ten sam wzór. Podobnie, jeśli wyobrazimy sobie jakiś obłok materii (niebieski owal na rysunkach), znajdujący się w polu magnetycznym (zielone linie), to ruchy tego obłoku lub zmiana jego kształtu nie zmienia geometrii pola (rys. górny). Jest to dla nas sytuacja normalna.

Jednak w warunkach plazmy kosmicznej, zarówno międzygwiazdowej, jak i tworzącej gwiazdy, normą staje się zjawisko **wmrożenia** pola magnetycznego w materię. Linie sił pola jakby przyklejały się do cząstek materii. Pole i materia stają się ze sobą ściśle związane. Z jednej strony pole utrudnia materii poruszanie się w poprzek linii sił. Jeżeli pole jest silne i dominuje nad materią, to porusza się ona wzdłuż linii sił pola. Jeżeli jednak materia zaczyna dominować nad polem, to każdy jej ruch zmienia geometrię pola.

Z tą drugą sytuacją mamy do czynienia na rysunku dolnym. W tym wypadku nasz niebieski obłok, rozciągając się, powoduje odpowiednie wygięcie linii sił pola. Tu efektem jest ich rozrzedzenie, czyli osłabienie pola. Ale możliwe jest też jego wzmocnienie, i to o wiele rzędów wielkości. Taki właśnie mechanizm leży u podstaw np. cyklu słonecznego, gdzie rolę „silnika” pełni różnicowa rotacja Słońca (szybsza na równiku, wolniejsza przy biegunach).



Źródło: SOHO (ESA & NASA)

Innym przykładem skomplikowanych relacji pomiędzy materią a włożonym w nią polem magnetycznym są protuberancje słoneczne. Podgrzana materia jest wyrzucana z powierzchni Słońca i porywa ze sobą pole magnetyczne (materia dominuje nad polem), które tworzy spektakularną pętlę rozgrzanej materii nad brzegiem tarczy. Ale gdy materia zacznie się ochładzać, to właśnie dzięki włożonemu polu (które teraz zaczyna dominować), „bezpiecznie” powraca wzdłuż linii sił pola na powierzchnię Słońca.

(red.)

Wiatr słoneczny i materię międzygwiazdową, jak każdą plazmę, można opisać za pomocą parametrów takich jak prędkość, gęstość, temperatura, natężenie pola magnetycznego itd. Równowaga ciśnień (dynamicznych, termicznych i magnetycznych łącznie) między tymi dwoma ośrodkami wyznacza granicę heliosfery i jej rozmiar. Od wewnątrz za kształtowanie heliosfery odpowiedzialne są głównie prędkość i gęstość wiatru słonecznego. Wraz ze wzrostem odległości od Słońca gęstość wiatru słonecznego spada z kwadratem odległości, natomiast prędkość można przyjąć praktycznie za niezależną od odległości.

Średnie rozmiary heliosfery w kierunku ruchu Słońca to ok. 120–150 j.a. Jednakże już znacznie bliżej, bo w odległości ok. 90 j.a. powstaje pierwsza warstwa graniczna heliosfery. Wiatr słoneczny jest tam już bardzo rzadki.

O ile w okolicach Ziemi gęstość protonów wynosi typowo 8 cm^{-3} , to 90 j.a. od Słońca jest to już tylko ok. $0,001 \text{ cm}^{-3}$. Znacznie mniejsze jest też natężenie pola magnetycznego włożonego w wiatr słoneczny. Prędkość wiatru gwałtownie spada poniżej 200 km/s i zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi wiatr słoneczny powinien z naddźwiękowego stać się poddźwiękowy. Skutkiem tego powstaje w tym miejscu fala uderzeniowa, zwana „końcową falą uderzeniową” lub krócej „szokiem końcowym”. Nie jest to zjawisko wyjątkowe w przyrodzie — każdy obiekt poruszający się w ośrodku z szybkością naddźwiękową wytwarza falę uderzeniową (zwaną gromem dźwiękowym). Przykład fali uderzeniowej obserwowanej w warunkach ziemskich prezentuje rys. 1.

Szok końcowy to owalna warstwa, w najbliższym punkcie odległa od

Słońca o około 90 j.a. Słowo „około” jest tu bardzo ważne, bowiem kształt i rozległość szoku końcowego nie są stałe — zależą od aktualnych warunków panujących w heliosferze i otaczającej ją materii międzygwiazdowej. Głównym graczem jest tu cykl aktywności słonecznej, gdyż w jego trakcie zmianie ulega struktura szerokościowa prędkości i gęstości wiatru słonecznego. Zwłaszcza na dużych szerokościach heliograficznych jest on raz szybszy i rzadszy (średnio do 800 km/s i 2–3 protonów/ cm^3 w minimum aktywności), a raz wolniejszy i gęstszy (średnio 450 km/s i około 8 protonów/ cm^3 w maksimum). Prędkość wiatru v i jego gęstość ρ składają się na ciśnienie dynamiczne, dane wzorem:

$$p = (\rho v^2) / 2,$$

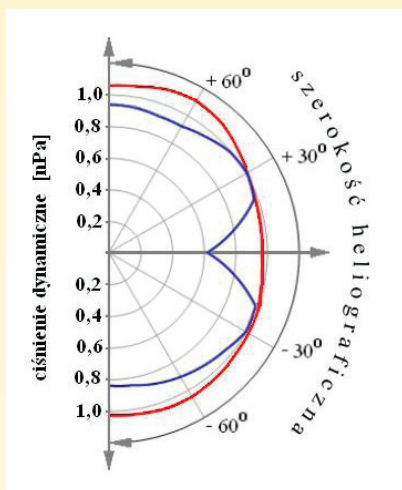
którego zmienność (rys. 2) odbija się w naturalny sposób na kształcie he-

liosfery i odległości szoku końcowego. Generalnie, im większe ciśnienie dynamiczne wiatru, tym rozleglejsza heliosfera.

Zmiana prędkości wiatru słonecznego na szoku końcowym jest skokowa, choć już przed nim wiatr minimalnie zwalnia. Dzieje się tak wskutek wzajemnego tarcia materii wiatru słonecznego z materią międzygwiazdową, która wnika do heliosfery. Dodatkowo, tuż przed szokiem dochodzi jeszcze spowolnienie przez plazmę od niego odbitą.

Za końcową falą uderzeniową nadal obserwujemy materię ze Słońca. Wiatr słoneczny płynie dalej, tylko wolniej. Jednocześnie wzrasta gęstość oraz temperatura ośrodka, a pole magnetyczne jako wzmrożone w plazmę dostosowuje się do zmian w plazmie poprzez wzrost natężenia. W miarę oddalania się od Słońca ciśnienie pochodzące od materii ze Słońca staje się coraz słabsze, aż w pewnym miejscu staje się równe ciśnieniu materii napływającej z zewnątrz. Tu materia pochodzenia międzygwiazdowego przestaje się mieszać z materią słoneczną. Jest to heliopauza — końcowa warstwa heliosfery. Przestrzeń między szokiem końcowym a heliopauzą nazywa się wewnętrznym otokiem (płaszczem) heliosferycznym, a przestrzeń za heliopauzą zwana jest zewnętrznym otokiem heliosferycznym.

Budowę heliosfery można w dość dużym przybliżeniu odtworzyć w warunkach domowych. Wystarczy przyrządzić sobie strukturę powstającą podczas wypływu wody z kranu na płaską powierzchnię (rys. 3). Powstająca w pewnej odległości od źródła cieczy fala to odpowiednik szoku końcowego. Jeżeli



Rys. 2. Wykres we współrzędnych biegunowych struktury szerokościowej (prostopadłe do płaszczyzny równika Słońca) ciśnienia dynamicznego wiatru słonecznego, w odległości 1 j.a. od Słońca. Linia niebieska — średnia z roku 2009 (minimum aktywności słonecznej). Linia czerwona — średnia z roku 2000 (maksimum aktywności)

jeszcze w tej samej płaszczyźnie dodamy dodatkowe źródło płynu, będące prostym odpowiednikiem napierającej na heliosferę materii międzygwiazdowej, odtworzymy warstwy graniczne heliosfery. Oczywiście nie możemy traktować tej prostej analogii jako modelu przepływu plazmy w heliosferze i na jej granicach, gdyż w domowych warunkach nie jesteśmy w stanie odtworzyć parametrów oddziałujących płynów, np. relacji między prędkościami i gęstościami. Nie ma również możliwości zasymulowania pola magnetycznego. Należy też pamiętać, że formowanie się granic heliosfery odbywa się w przestrzeni trójwymiarowej a nie płaskiej, jak to się dzieje w przypadku przedstawionym na rys. 3.

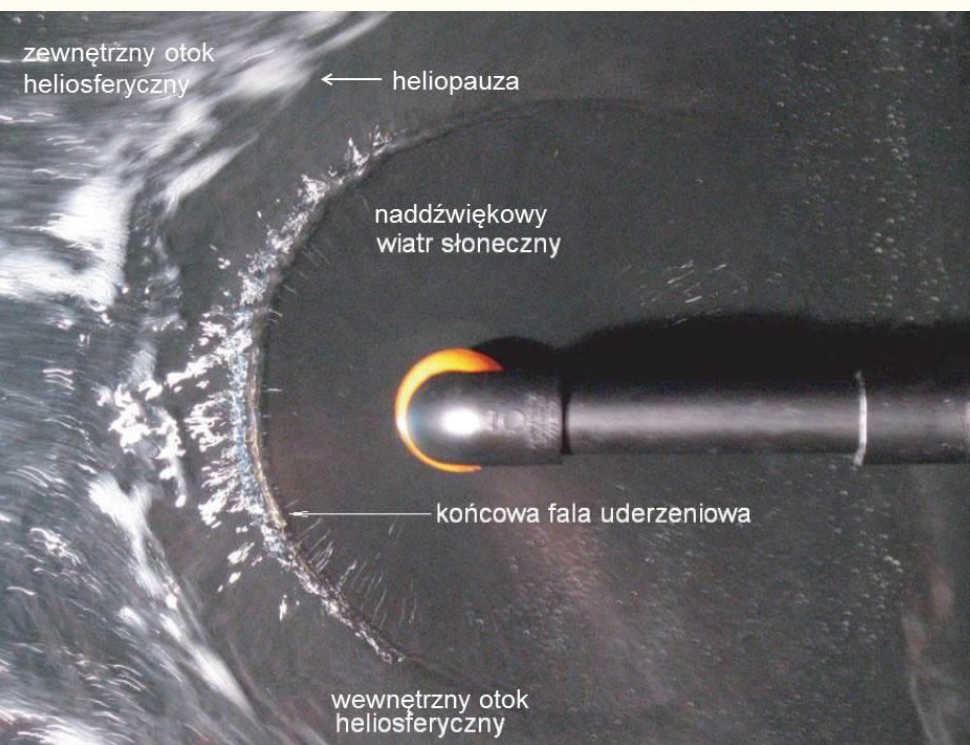
Bliższy rzeczywistości obraz he-

liosfery i jej otoczenia przedstawia rys. 4. Pod naporem gazu międzygwiazdowego heliosfera traci sferyczny kształt. Z jednej strony wyciąga się w długi ogon, naprzeciwko zaś mamy spłaszczony i asymetryczny nos. Na rys. 4 zielonym kolorem zaznaczono jeszcze jedną strukturę, powstającą na styku materii międzygwiazdowej z heliosferą. Dla materii międzygwiazdowej Słońce jest prawie niezauważalną, małą przeszkodą, czymś na kształt wystającego kamienia opływającego przez nurt rzeki. Na wodzie przed przeszkodą powstaje wtedy wzburzenie, nazywane falą czołową. Taka sama fala tworzy się przed heliosferą. Jest ona zaburzeniem powstającym w miejscu, gdzie materia międzygwiazdowa natrafia na przeszkodę, jaką jest heliosfera. Ośrodek międzygwiazdowy zaczyna się w tym miejscu kotłować i opływać przeszkodę. Falę czołową udało się bezpośrednio sfotografować w sąsiedztwie kilku innych gwiazd, wokół których odkryto tzw. astrosfery, czyli gwiazdowe odpowiedniki naszej heliosfery. Obrazy te dają nam najlepsze, bo rzeczywiste wyobrażenie o kształcie heliosfery widzianej z zewnątrz (rys. 5).

Voyagery na rubieżach heliosfery

Przez wiele lat nasze wyobrażenie o granicach heliosfery i oddziaływaniu materii międzygwiazdowej z wiatrem słonecznym było oparte wyłącznie na modelach teoretycznych. Modeli tych używano do interpretacji zjawisk takich jak ultrafioletowa poświata w linii wodoru Lyman α (121,6 nm) czy linii helu neutralnego 58,4 nm. Samo istnienie heliosfery zostało wywnioskowane na podstawie interpretacji mapy świecenia nieba w linii Lyman α . Zjawisk zachodzących na granicy heliosfery nie można obserwować bezpośrednio. Tradycyjne metody astronomii obserwacyjnej są tu bezradne, gdyż galaktyczne tło jest dużo silniejsze niż słaby sygnał fotonowy powstający na krańcach heliosfery.

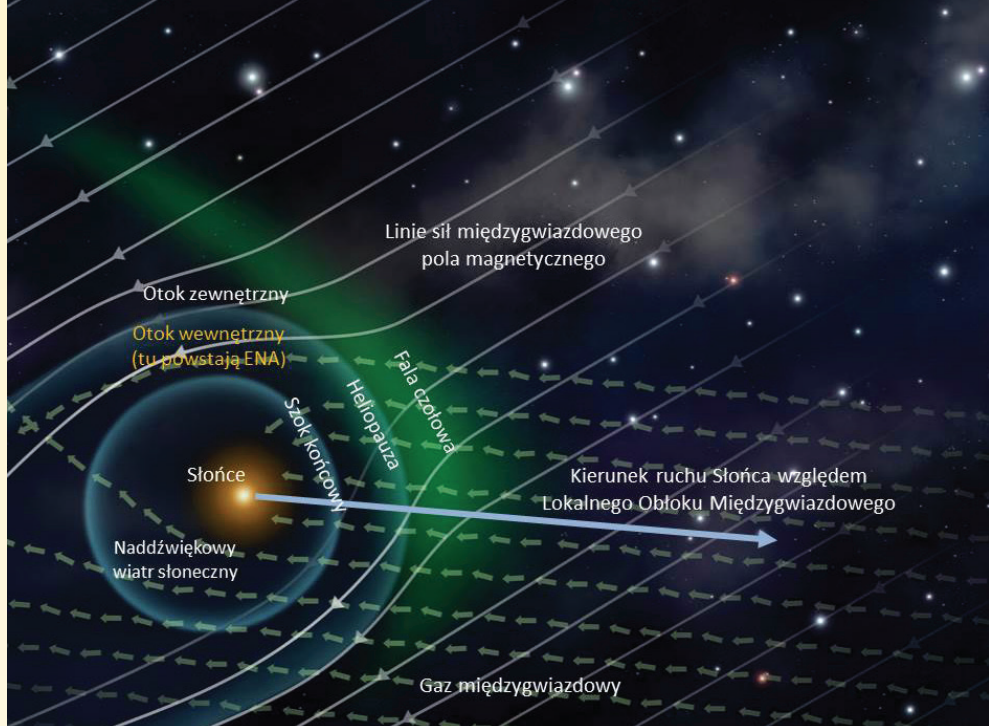
Rys. 3. Kuchenny model heliosfery. Aparat fotograficzny umieszczono wprost nad kranem. Wypływająca z niego woda rozlewa się promieniście, udając wiatr słoneczny. Z lewej strony napływa płaski strumień mydlin, reprezentujący materię międzygwiazdową. (fot. J.R. Jokipii, za zgodą autora.) Można sobie wyobrazić ładniejszą wersję takiego modelu, np. w której ciecz różnił się kolorem. Zachęcamy czytelników do prób. Uwaga, żeby trwale nie przebarwić wanny! Udane zdjęcia nagrodzimy



Rys. 4. Wizja artystyczna budowy heliosfery. Kierunek napływu neutralnego gazu międzygwiazdowego reprezentowany jest przez małe, szare strzałki w dolnej części rysunku. Projekt graficzny: M.A. Kubiak, M. Frolow Tentaris

Dopiero sondy Voyager 1 i 2 stworzyły szansę na bezpośrednie zbadanie materii w tym obszarze. Wyruszyły one w podróż ku granicom Układu Słonecznego w 1977 r. Ich nadrzędnym celem było zbadanie planet olbrzymów Układu Słonecznego. Jednak po wypełnieniu tego zadania mogły nadal wykonywać obserwacje otaczającej je materii, podążając w kierunku granic heliosfery. Od początku misji stale dostarczają na Ziemię informacji o prędkości i gęstości wiatru słonecznego (tylko Voyager 2), o polu magnetycznym oraz o poziomie promieniowania kosmicznego. Statki te poruszają się po odmiennych orbitach. Sonda Voyager 1 próbuje północną część heliosfery, a Voyager 2 południową (rys. 6).

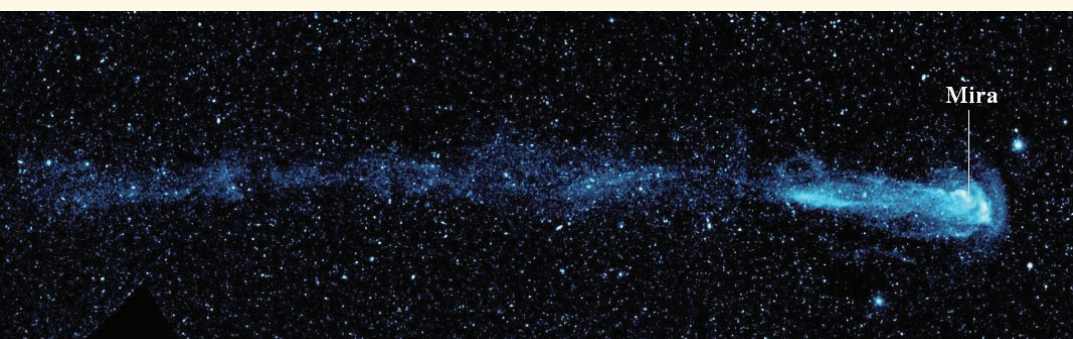
Niemalże po 30 latach od startu, w roku 2004 dane z sondy Voyager 1 wykazały zmiany rejestrowanych czę-



stek energetycznych pochodzenia pozaheliosferycznego oraz zmiany w polu magnetycznym, typowe dla przejścia przez szok końcowy (rys. 7 góra i rys. 8). Statek znajdował się wówczas w odległości 94 j.a. od Słońca. W trzy

lata później, w 2007 r. sonda Voyager 2 w odległości 84 j.a. zaobserwowała gwałtowny spadek prędkości rejestrowanego wiatru słonecznego oraz skok wartości pola magnetycznego (rys. 7 środek i dół). Jednoznacznie oznaczało

to przejście przez końcową falę uderzeniową. Jednakże dostarczone pomiary wykazały, że wiatr słoneczny z naddźwiękowego nie stał się zupełnie poddźwiękowy, tak jak się spodziewaliśmy. Czyżby teoria zawiodła? Nie, nic bardziej mylnego. Voyager 2 rejestrował głównie protony wiatru słonecznego. Ograniczenia detektora powodują, że nie widzi on wszyst-



Rys. 5. Dwa przykłady astro-sfer, czyli odpowiedników heliosfery dla innych gwiazd.

Góra: Wiatr wywiewany przez gwiazdę LL Orionis, zderzając się z gazem napływającym z centrum Mgławicy Oriona, tworzy wyraźną falę czołową. (Źródło: NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA))

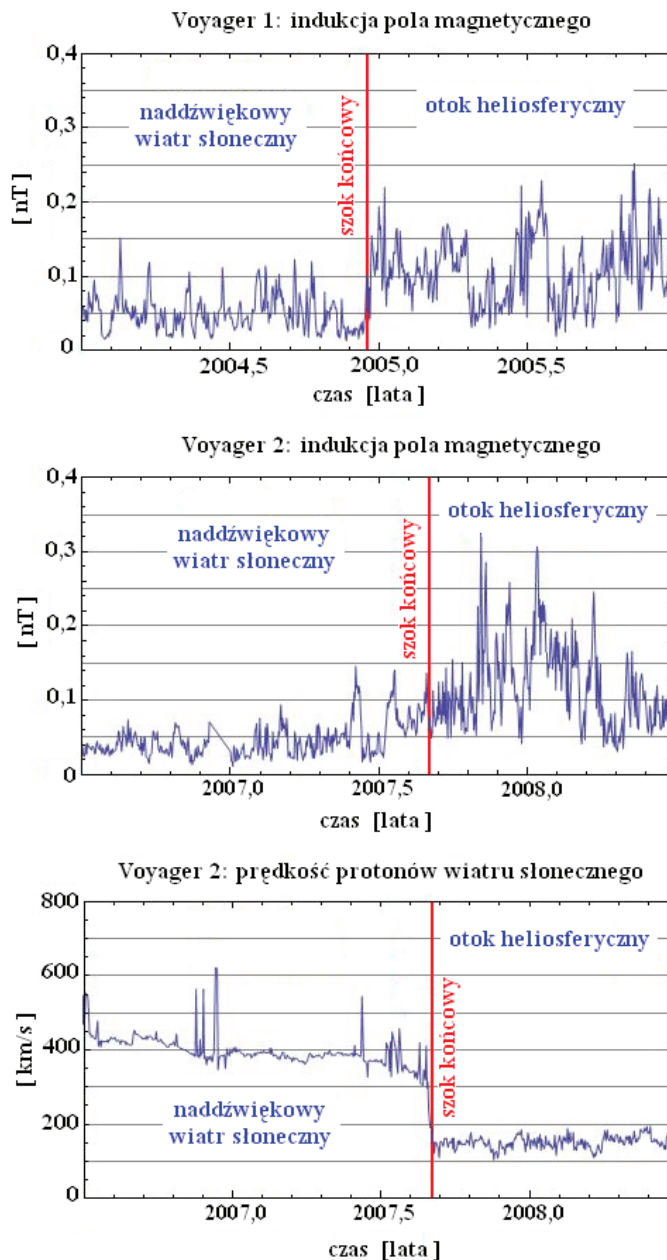
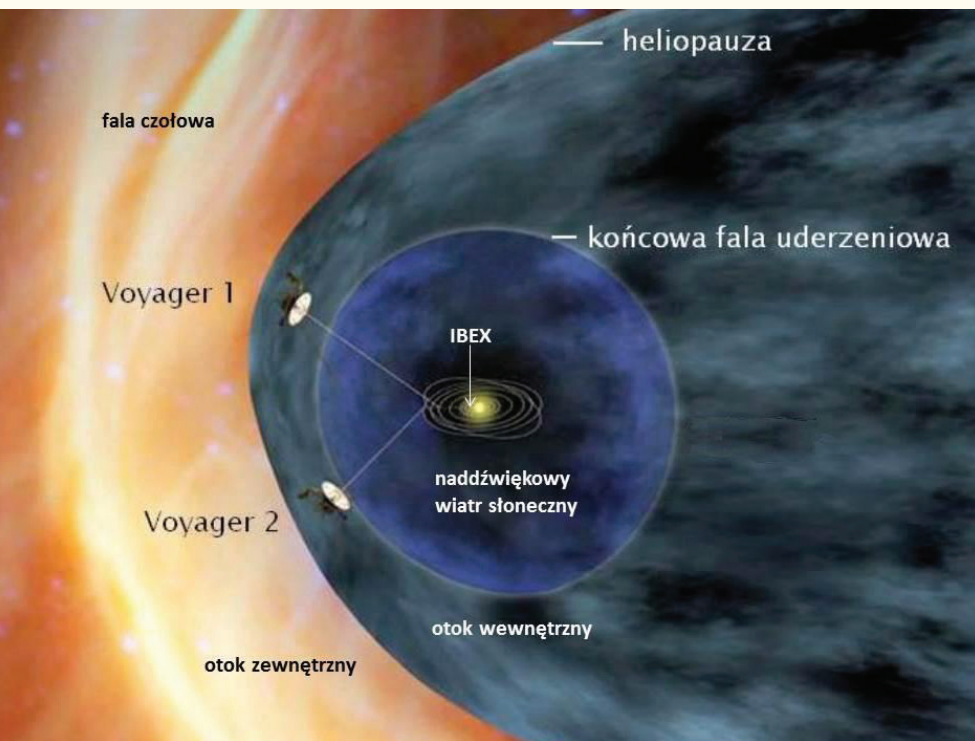
Dół: Mira (o Ceti), jako pulsujący czerwony olbrzym traci materię w tempie 0,1 masy Ziemi na rok. Przy tym pędzi względem otaczających ją obłoków z prędkością 130 km/s, więc wywiewana materia wyciąga się w kometopodobny ogon o długości 13 lat św. (Zdjęcie wykonano w ultrafiolecie, źródło: NASA/JPL-Caltech)

kich rodzajów cząstek. Tymczasem tam gdzie tworzy się szok końcowy, coraz bardziej znaczącym składnikiem wiatru słonecznego stają się tzw. jony wychwycone, które są zjonizowanymi w wietrze słonecznym atomami pochodzenia międzygwiazdowego, różniące się od wiatru słonecznego gęstością i temperaturą. Aby w pełni opisać zmianę wiatru słonecznego z naddźwiękowego na poddźwiękowy, należy rozważyć wszystkie składowe wiatru słonecznego w danym miejscu: protony i elektrony wiatru słonecznego oraz jony wychwycone. Jeśli się to robi, okazuje się, że na pierwszej granicy heliosfery przepływ plazmy z naddźwiękowego rzeczywiście staje się poddźwiękowy.

Różnica zaobserwowanych przez sondy odległości szoku końcowego wskazuje na zmienność w czasie rozmiarów heliosfery oraz na prawdopodobną asymetrię końcowej fali uderzeniowej, spowodowaną zmienną szerokościową strukturą wiatru słonecznego.

Od tamtego czasu obydwie sondy z powodzeniem nadal przesyłają dane, tym razem już z wewnętrznego obszaru otoku heliosferycznego. Ponieważ obydwie sondy poruszają się z prędkością powyżej 3 j.a. na rok (Voyager 1 — 3,6 j.a./rok, Voyager 2 — 3,3 j.a./rok), oszacowano, że przekroczenie heliopauzy powinno nastąpić co najmniej 10 lat po przekroczeniu szoku końcowego. Tyle mniej więcej czasu powinno zająć sondom pokonanie odległości od 30 do 50 j.a. bo na tyle oceniamy grubość otoku heliosferycznego. W połowie 2012 r.

Rys. 6. Wzajemne położenie obu sond Voyager okiem artysty (źródło: NASA/JPL-Caltech)



Rys. 7. Ilustracja przejścia Voyagerów przez szok końcowy. Voyager 1 zarejestrował wzrost natężenia pola magnetycznego, typowy dla przejścia przez szok. Voyager 2 zaobserwował analogiczną zmianę pola magnetycznego oraz skokową zmianę prędkości protonów wiatru słonecznego. Dane pochodzą ze strony <http://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

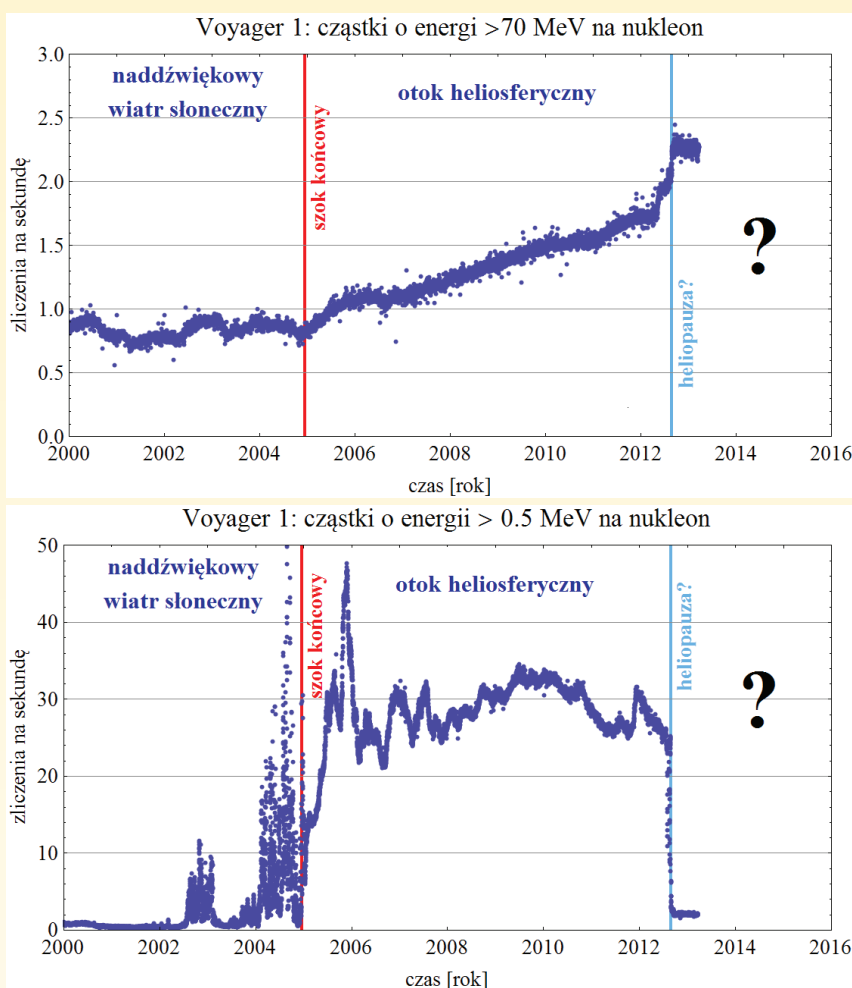
sonda Voyager 1 zaobserwowała gwałtowny spadek niskoenergetycznych cząstek promieniowania kosmicznego przy jednoczesnym wzroście strumienia cząstek wysokoenergetycznych pochodzenia pozaheliosferycznego (rys. 8). Statek prawdopodobnie wniknął do obszaru, w którym zaczęły dominować cząstki o znacznie wyższych energiach niż wiatr słoneczny lub wręcz tam, gdzie wiatru słonecznego już nie ma. Bardzo prawdopodobne, że znalazł się w obszarze bliskim he-

liopauzy. Do zdarzenia tego doszło w odległości 123 j.a. od Słońca (por. „Urania” 1/13, s. 29).

Voyagery są pierwszymi obiektami stworzonymi przez człowieka, które dotarły aż tak daleko, stale dostarczając danych obserwacyjnych na Ziemię. To wielki sukces nauki. Należy jednak pamiętać, że obie sondy opowiadają nam wyłącznie o miejscu, w którym akurat się znajdują. Ich pomiary bywają ekstrapolowane z niewyobrażalną odwagą na całą przestrzeń. To tak jakby rozmawiać o geografii całej Ziemi wyłącznie na podstawie znajomości terenu naszej najbliższej okolicy. I tak, będąc mieszkańcem centralnej Polski, możemy błędnie stwierdzić, że cała Ziemia pokryta jest łądem o średnim zalesieniu. W takim podejściu zupełnie nie dopuszczamy możliwości istnienia mórz i oceanów, pustyń, puszczy czy łądolołdów. Podobnie jest z interpretacją danych z Voyagerów. Aby uzyskać całościowy obraz heliosfery oraz procesów, które zachodzą na jej granicach, potrzebna jest inna metoda. Taka, która pozwoliłaby nam ogarnąć wzrokiem szerszą perspektywę.

Okiem „Koziorożca”

Materia napierająca na Układ Słoneczny zamknięty w heliosferze nie tylko ją opływa, ale również częściowo przedostaje się przez poszczególne warstwy graniczne i dociera do Słońca. Atomy gazu międzygwiazdowego, jako obiekty elektrycznie neutralne, są nieczułe na wszechobecne pole magnetyczne i mogą swobodnie podróżować przez heliosferę. Ale atom, który wniknął do otoku heliosferycznego wypełnionego materią ze Słońca, może wymienić ładunek elektryczny z jonami wiatru słonecznego, oddając im elektron. Jeżeli do takiej wymiany dojdzie, wówczas atom międzygwiazdowy sam staje się jonem i zaczyna odczuwać obecność pola magnetycznego. Porwany przez nie staje się częścią wiatru słonecznego i wraz z nim opływa heliosferę. Jon powstały w ten sposób nazywany jest jonem wychwyconym. Natomiast jon z wiatru słonecznego (najczęściej proton), który w wyniku wymiany ładunku otrzymał elektron, staje się atomem neutralnym i przestaje odczuwać pole magnetyczne. Zaczyna więc poruszać się swobodnie w przestrzeni. Atom powstały w wyniku takiej reakcji nazywany jest energe-



Rys. 8. Wyniki pomiarów sondy Voyager 1. Zauważmy spadek w roku 2012 strumienia cząstek o energiach typowych dla otoku heliosferycznego (góra) oraz jednoczesny wzrost strumienia cząstek wysokoenergetycznych pochodzenia pozaheliosferycznego (dół). Możliwe, że sonda dotarła do obszaru, gdzie nie ma już wiatru słonecznego.

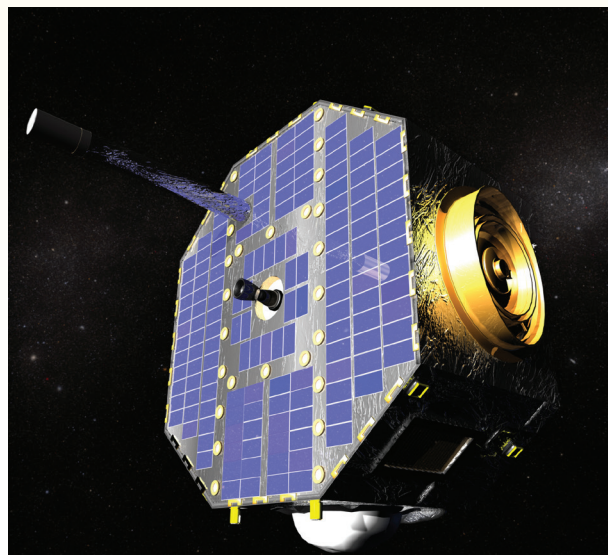
Dane pochodzą ze strony <http://voyager.gsfc.nasa.gov/heliopause/archive.html>

tycznym atomem neutralnym (ENA — ang. *energetic neutral atom*). Wymiana ładunku zachodzi bez wymiany pędu, a więc tuż po zderzeniu cząstki zachowują swój pierwotny pęd. Aby ENA powstałe gdzieś na krańcach heliosfery można było zarejestrować przy Słońcu, proton tuż przed wychwytem elektronu musi mieć wektor prędkości skierowany do Słońca. W praktyce tylko mała część ENA spełnia ten warunek.

Przepływ wiatru słonecznego między szokiem końcowym a heliopauzą nie jest spokojny i laminarny, lecz raczej ma charakter turbulentny, więc nowo powstające ENA rozbiegają się we wszystkich możliwych kierunkach.

Po drodze do Słońca strumień ENA ulega osłabieniu wskutek ich jonizacji, która zdarza się tym częściej, im bliżej Słońca. Dzieje się to przede wszystkim poprzez wymianę ładunku z jona-

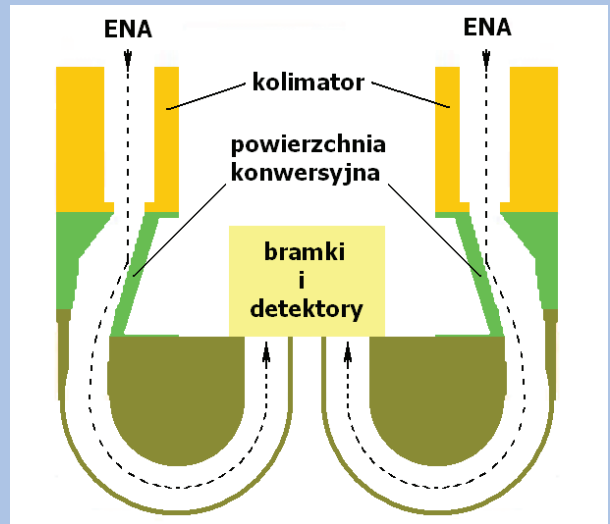
Rys. 9. Artystyczna wizja sondy IBEX na orbicie. IBEX ma szerokość poniżej 1 m i wysokość około 0,5 m. Powierzchnia zwrócona w stronę Słońca jest pokryta panelami słonecznymi. Obraca się wokół osi prostopadłej do tej powierzchni. Widoczny długi pręt to antena do komunikacji z Ziemią, a mały czarny „kieliszek” w środku to stabilizator osi obrotu. Biała wypukłość u spodu jest osłoną jednego z dwóch zbiorników hydrazyny służącej jako paliwo. Złoty talerz widoczny po prawej to detektor IBEX-Lo. Detektor IBEX-Hi znajduje się po przeciwnej stronie satelity i wygląda podobnie. Źródło: NASA The IBEX Team



Jak działa „teleskop ENA-owy”

Rysunek przedstawia bardzo uproszczony schemat przekroju detektora IBEX-Lo. Atomy neutralne (ENA) dostają się do detektora od góry. Znajdujący się na wejściu kolimator filtruje dostające się do instrumentu cząstki. Nie dopuszcza do układu cząstek niepożądanych — elektronów, jonów wysokoenergetycznych i innych, wybierając wyłącznie ENA. Tylko cząstki wpadające do kolimatora prawie prostopadłe są analizowane, dzięki czemu można ustalić kierunek, z którego przyleciała cząstka. Po przejściu przez kolimator atom neutralny uderza w tzw. powierzchnię konwersyjną, wychwytując z niej elektron i stając się w ten sposób jodem ujemnym. Jest on następnie prowadzony przez pola magnetyczne i elektryczne wewnątrz przyrządu do bramek układu antykoincydencyjnego. Czasy przelotu przez poszczególne bramki są rejestrowane. Jeśli czasy przelotu są spójne, tzn. wskazują parami na takie same szybkości jonu, to jest on kwalifikowany jako rzeczywisty atom neutralny o energii odpowiadającej zmierzonej prędkości.

Niektóre z padających atomów, w szczególności atomy helu i neonu, nie wychwytują elektronu, lecz wybijają atomy z materiału powierzchni konwersyjnej oraz z warstwy pokrywającej ją wody, z których część jest naładowana ujemnie. Analiza stosunków liczb wybitych atomów pozwala określić, jaki atom wpadł do detektora.



Przyrząd IBEX-Hi nie ma powierzchni konwersyjnej, lecz folię, po uderzeniu w którą atom traci elektron, stając się jodem dodatnim. Dalej zasada pomiaru jest praktycznie identyczna jak w przypadku IBEX-Lo. (JMS)

mi wiatru słonecznego oraz jonizację przez skrajnie ultrafioletowe promieniowanie ze Słońca. Mniejszą rolę odgrywa również jonizacja zderzeniowa z elektronami wiatru słonecznego.

Metoda obserwowania materii międzygwiazdowej z granic Układu Słonecznego poprzez detekcję energetycznych atomów neutralnych była już z powodzeniem stosowana od kilkunastu lat m.in. w misjach Cassini, IMAGE, Mars- i Venus Express. Jednak we wszystkich tych przypadkach strumienie ENA były mierzone wyłącznie z małych obszarów nieba, nie dając pełnego obrazu. W praktyce wyglądało to tak, jakbyśmy próbowali odtworzyć puzzle, mając do dyspozycji wyłącznie kilka niepowiązanych ze sobą elementów. Dlatego w 2002 r. międzynarodowy zespół badaczy, z udziałem uczonych z Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie, zaproponował stworzenie sondy, która będzie w stanie obserwować całe niebo w zakresie energetycznych atomów neutralnych. Tak powstał IBEX, pierwsze obserwatorium atomów neutralnych (rys. 9).

IBEX (po angielsku koziorożec alpejski) to akronim od słów *Interstellar Boundary Explorer* (badacz granicy międzygwiazdowej). Jest to mały i tani satelita wielkości sporej (futurystyczny 19

października 2008 r. na silnie wydłużoną okołozemską orbitę eliptyczną i z końcem grudnia 2008 r. zaczął dostarczać danych obserwacyjnych. Na jego pokładzie znajdują się dwa detektory nastrojone na obserwowanie atomów w szerokim zakresie energetycznym: IBEX-Lo (0,01—2 keV) oraz IBEX-Hi (0,3—6 keV). Dzięki tak szerokiemu zakresowi obserwacji, możemy „zobaczyć” atomy poruszające się z prędkościami od kilkunastu do tysiąca km/s. Detektory rejestrują od jednego ENA na godzinę do kilku na sekundę. IBEX nie widzi całego nieba jednocześnie, ale złożenie ruchu obrotowego IBEX-a z jego ruchem po orbicie pozwala na stworzenie pełnej mapy nieba w ciągu 6 miesięcy. Misja była planowana na 2 lata, lecz dzięki zmianie orbity na bardziej stabilną, zsynchronizowaną z ruchem Księżyca, zapasów paliwa powinno wystarczyć jeszcze na co najmniej 15 lat.

IBEX-Hi dostarcza danych o energetycznych atomach neutralnych wodoru, czyli przede wszystkim o atomach powstałych między heliopauzą a szokiem końcowym, w opisanym wyżej procesie neutralizacji protonów wiatru słonecznego. Natomiast IBEX-Lo obserwuje neutralne międzygwiazdowe atomy wodoru, helu, tlenu i neonu. Pomiary ostatnich dwóch

pierwotków dostarczają cennych informacji, na podstawie których można oszacowywać stosunek obfitości Ne/O w heliosferze i poza nią.

Hel, jako jedyny z czterech obserwowanych przez IBEX-a pierwiastków — składników gazu międzygwiazdowego, dociera do Ziemi prawie niezaburzony przez środowisko, w którym się porusza. Zawdzięcza to temu, że jest słabo jonizowany w heliosferze. To jego ogromna zaleta. Dlatego przez setki jednostek astronomicznych zachowuje parametry gazu, z którego pochodzi, zmodyfikowane jedynie przez grawitację słoneczną. Analizując wykonane przez IBEX-a obserwacje neutralnego międzygwiazdowego helu, można wyznaczyć najważniejsze parametry strumienia gazu międzygwiazdowego napływającego na heliosferę: kierunek ruchu, prędkość oraz temperaturę napływającego gazu. Dokonały tego dwie niezależne grupy badaczy, w tym grupa polska z CBK PAN, kierowana przez prof. Macieja Bzowskiego. Wyniki uzyskane przez obie grupy są następujące:

- kierunek napływu: długość eliptyczna $\lambda = 259^\circ$, szerokość eliptyczna $\beta = 5^\circ$,
- prędkość: 23 km/s,
- temperatura: 6200 K.

Kierunek napływu (okolice η Ophiuchi) to przybliżone położenie nosa heliosfery. Dokładna znajomość szybkości napływu gazu międzygwiazdowego i jego temperatury nie tylko pozwala na poznanie stanu fizycznego obłoku międzygwiazdowego, w którym jest zanurzone Słońce, ale ma fundamentalne znaczenie dla fizyki heliosfery. Są to podstawowe parametry używane w modelowaniu heliosfery.

Pozostałe pierwiastki podlegają większym stratom. Duża podatność na jonizację powoduje, że ich strumień docierający do Ziemi jest zmodyfikowany w stosunku do tego, co się przedostało do heliosfery. Ulega on zmianom już w otoku heliosferycznym, a następnie jest osłabiany wewnątrz szoku końcowego, im bliżej Słońca, tym mocniej. Ponadto warunki jonizacji nie są stałe w czasie, zmieniają się wraz z cyklem aktywności słonecznej. Zmiany te muszą być starannie wzięte pod uwa-

gę podczas interpretowania danych obserwacyjnych, gdyż rejestrowane atomy przebywają przestrzeń od szoku końcowego do Ziemi w czasie od kilkudziesięciu dni do kilku, a czasem kilkunastu lat.

Zespół warszawski jest odpowiedzialny za modelowanie czynników jonizujących atomy obserwowane przez IBEX-a i wylicza dla każdego atomu prawdopodobieństwa przeżycia na drodze od źródła do detektora. Polega to w pierwszej kolejności na wyznaczeniu orbity każdego atomu. Przykładowo wodór, poruszając się przez heliosferę, odczuwa nie tylko przyciągające działanie pola grawitacyjnego Słońca, ale również przeciwdziałające grawitacji ciśnienie promieniowania Słońca w linii Lyman α . Gdy są znane już trajektorie poszczególnych atomów widzianych przez IBEX-a, kolejnym krokiem jest zbadanie, jakim stratom na danej orbicie może ulec atom o wybranej energii. Obliczenia prowadzi się dla każdego piksela na niebie osobno. Mając w ręku prawdopodobieństwa przeżycia przygotowane przez

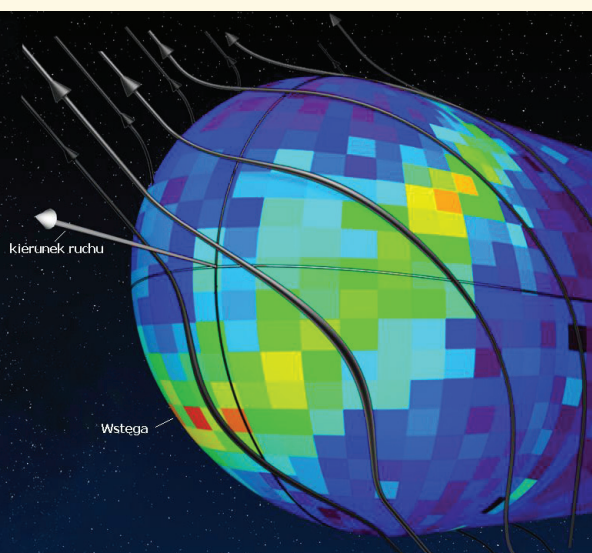
Mgr Justyna M. Sokół jest doktorantką w Zespole Fizyki Układu Słonecznego i Astrofizyki Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk. Zajmuje się modelowaniem procesów jonizacyjnych w heliosferze i wspiera prace zespołu naukowego misji IBEX.



zespół z CBK PAN, grupa z USA, odpowiedzialna za tworzenie map IBEX-a, wprowadza poprawkę do obserwowanego strumienia i uzyskuje w ten sposób mapy nieba wodorowych ENA w odległości źródłowej, czyli w hipotetycznym miejscu ich powstawania. Na podstawie obecnej wiedzy przyjmuje się, że ENA powstają między szokiem końcowym a heliopauzą, w wewnętrznym otoku heliosferycznym.

Przykładowa mapa wodorowych ENA przedstawiona jest na rys. 10. Widać na niej rozkład energetycznych atomów neutralnych oraz strukturę przypominającą kształtem pierścienie. Ów pierścień, nazwany przez badaczy Wstęgą, to być może najważniejsze odkrycie IBEX-a. Jest to obszar zwiększonej emisji energetycznych atomów neutralnych, nieprzewidziany w żadnych modelach. Do tej pory nie wiemy, jak Wstęga powstaje i co ją powoduje. Nie wiemy nawet, czy powstaje w heliosferze, czy może gdzieś dalej, jak przypuszcza prof. S. Grzędzielski z CBK PAN.

Pomiary wykonywane bezpośrednio na miejscu przez sondy Voyager 1 i 2 potwierdzają nasze przypuszczenia z modeli teoretycznych o istnieniu szoku końcowego i heliopauzy. Natomiast dzięki misji IBEX możemy zajrzeć w głąb zjawisk i procesów zachodzących w otoku heliosferycznym oraz wzbogacić naszą wiedzę o fizyce oddziaływania materii pochodzącej ze Słońca z materią międzygwiazdową. Jesteśmy również w stanie dokładnie ocenić stan fizyczny materii bezpośrednio otaczającej heliosferę. Po 30 latach od startu Voyagerów nasza wiedza o granicach ośrodków gwiazdowych została zweryfikowana i rozszerzona o nowe doświadczenia.



Rys. 10. Góra: mapa nieba we współrzędnych ekliptycznych, obrazująca rozkład wodorowych ENA o energii 1,1 keV. Jest to złożenie map z 3 lat obserwacji. Strumienie skorygowano na prawdopodobieństwa przeżycia atomów w heliosferze (Źródło: McComas i in. 2012).

Dół: Mapa wodorowych ENA, zrzutowana na heliopauzę. Wstęga wydaje się być rządzona przez galaktyczne pole magnetyczne (ciemne linie). (Źródło: IBEX team and NASA/Goddard Space Flight Center)

