

Oddziaływanie Słońca z materią galaktyczną

Granice heliosfery oczami IBEX-a



JUSTYNA M. SOKÓŁ

Centrum Badań Kosmicznych
Polska Akademia Nauk

jsokol@cbk.waw.pl

Mgr Justyna M. Sokół jest doktorantką w Zespole Fizyki Układu Słonecznego i Astrofizyki CBK PAN. Zajmuje się modelowaniem procesów jonizacyjnych w heliosferze i wspiera prace zespołu naukowego misji IBEX.

W 2009 roku w środowisku heliofizyków zawrzało, kiedy pół roku od startu sonda IBEX na pierwszej mapie pełnego nieba pokazała zamiast przewidywanego rozmazanego placka coś, co kształtem przypomina wstęgę. Z początkiem 2012 roku IBEX kolejny raz zmienił dotychczasowy obraz heliosfery

Pomysł na zbudowanie IBEX-a (ang. *Interstellar Boundary Explorer*, czyli badacz granicy międzygwiazdowej) pojawił się w 2002 roku, kiedy astrofizycy zdali sobie sprawę, że niewiele wiedzą o najbliższym otoczeniu Słońca w Galaktyce i że niewiele więcej się dowiedzą, jeśli nie zastosują nowej techniki obserwacyjnej. Nowe badania umożliwiła pionierska metoda obrazowania za pomocą energetycznych atomów neutralnych (ENA).

Jak zobaczyć ENA?

Powstają one na skutek wymiany ładunku między energetycznymi jonami i powolnymi atomami. Atomy nie „czują” pola magnetycznego i poruszają się swobodnie; natomiast ruchem jonów – posiadających nieskompensowany ładunek elektryczny – rządzi lokalne pole magnetyczne. Jeżeli rozpędzony proton zbliży się dostatecznie do powolnego atomu, następuje wymiana elektronu. Powolny atom oddaje elektron protonowi, który staje się nieczuły na pole magnetyczne, a atom, który oddał elektron, jako jon zostaje przez pole magnetyczne pochwycony. Procesy wymiany ładunku, prowadzące do powstawania ENA, zachodzą między innymi na granicy między

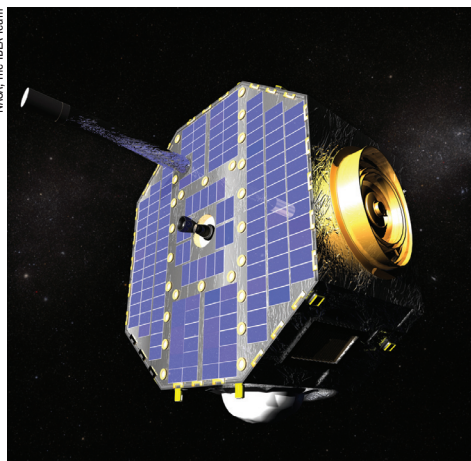
materią pochodzącą od Słońca a materią międzygwiazdową otaczającą Układ Słoneczny.

Obserwacje ENA dostarczają bezpośrednich informacji o granicach Układu Słonecznego oraz o oddziaływaniu Słońca z jego najbliższym galaktycznym otoczeniem. Promieniowanie elektromagnetyczne, z powodzeniem stosowane w innych dziedzinach astrofizyki, w badaniu granic Układu Słonecznego nie ma zastosowania, gdyż tonie w pozaheliosferycznym tle. Aby móc rozejrzeć się wokół Słońca w odległości kilkudziesięciu jednostek astronomicznych, naukowcy musieli wyposażyć się w detektory ENA.

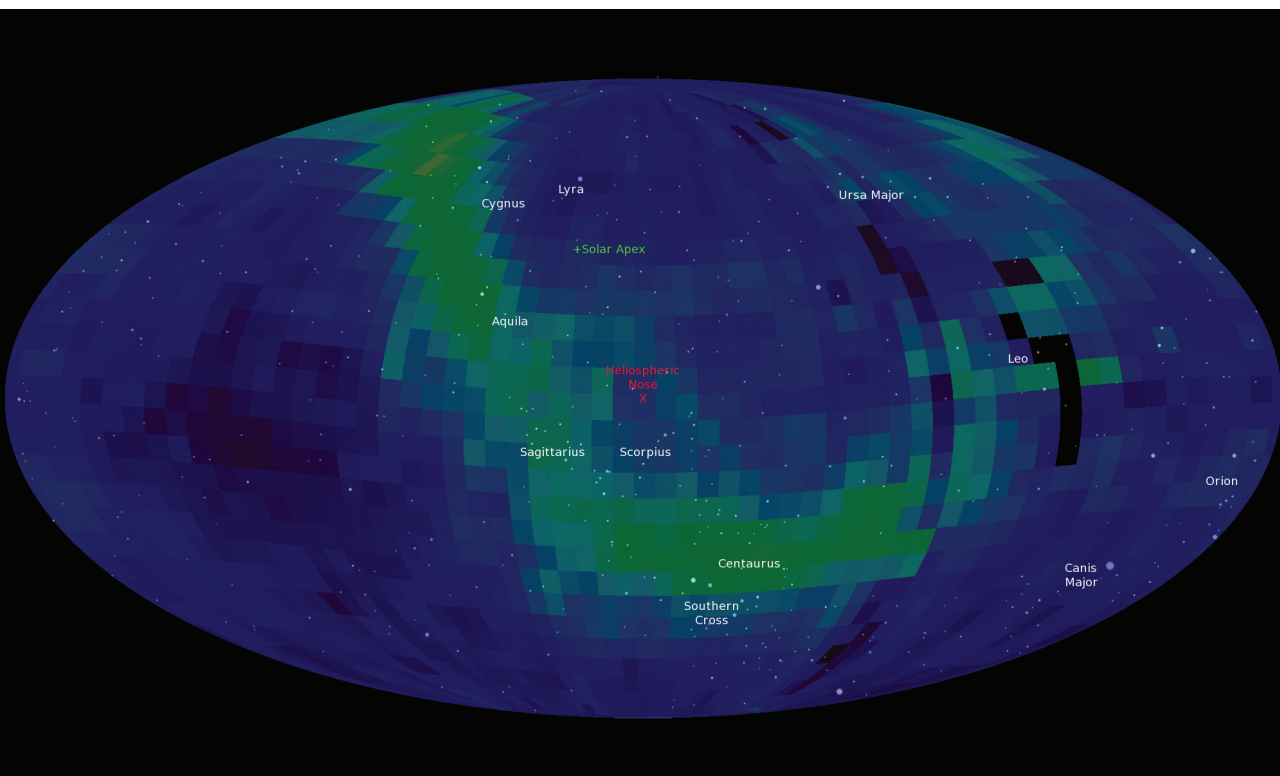
Całe niebo IBEX-a

Metodę obserwowania materii międzygwiazdowej poprzez detekcję ENA stosowano już wcześniej, ale IBEX, jako pierwszy w historii, może dokonywać pomiarów strumienia ENA z całego nieba. Obraz ten okazał się zupełnie inny, niż oczekiwano.

IBEX został wystrzelony na orbitę 19 października 2008 i rozpoczął obserwacje pod koniec grudnia 2008 roku. Na jego pokładzie znajdują się dwa detektory, które mogą obserwować atomy o energiach od 0.01 do 6 keV. Rotacja IBEX-a oraz jego ruch wraz z Ziemią wokół Słońca pozwalają na stworzenie pełnej mapy nieba w ciągu 6 miesięcy. Początkowo misja przewidziana była na co najwyżej cztery lata, ale ostatnio udało się przenieść satelitę na



Artystyczna wizja sondy IBEX na orbicie



NASA, The IBEX Team

Obraz nieba z IBEX-a na tle letnich gwiazdozbiorów i Drogi Mlecznej

inną, bardziej stabilną orbitę, zsynchronizowaną z ruchem Księżyca, dzięki czemu paliwa wystarczy mu jeszcze na co najmniej 15 lat.

W skład międzynarodowego zespołu zaangażowanego w misję IBEX wchodzi kilkusobowa grupa z Zespołu Fizyki Układu Słonecznego i Astrofizyki z Centrum Badań Kosmicznych PAN: dr hab. Maciej Bzowski, prof. dr hab. Stanisław Grzędzielski, dr hab. Andrzej Czechowski, dr inż. Marek Hłond, mgr Marzena A. Kubiak i mgr Justyna M. Sokół.

Wiatr i materia

Z korony Słońca wciąż wypływają strumienie plazmy (jonów i elektronów), rozciągające się w przestrzeń międzyplanetarną na dziesiątki jednostek astronomicznych, coraz rzadsze i zimniejsze wraz z odległością od gwiazdy. Te strumienie materii nazywane są wiatrem słonecznym. Nie można go bezpośrednio zmierzyć z Ziemi, gdyż chroni nas przed nim ziemska magnetosfera.

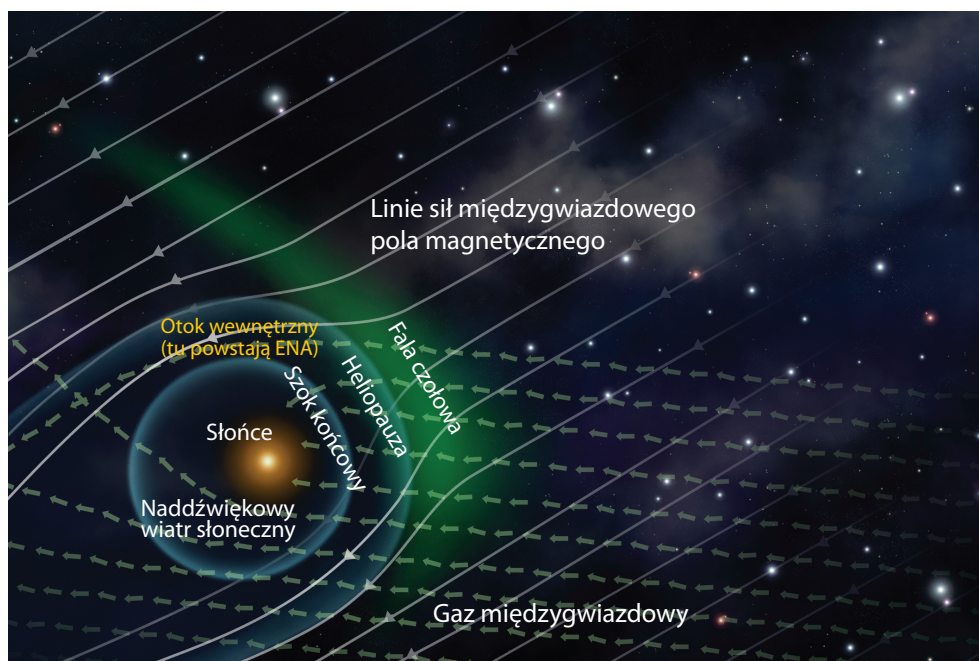
Przestrzeń międzygwiazdowa wokół Słońca wypełniona jest materią, będącą m.in. pozostałościami po wybuchach supernowych. Materia ta przeniknięta jest polem magnetycznym i składa się z neutralnego gazu, plazmy i pyłu. Wiatr, wydostający się z gwiazdy, oddziałuje z otaczającą gwiazdę materią i tworzy wokół niej pęcherz, zwany astrosferą. IBEX ma za zadanie zbadanie tego oddziaływania.

Astrosfera Słońca, nazywana heliosferą, jest wypełniona przez naddźwiękowy wiatr słoneczny. Jej granicę wyznacza równowaga ciśnień między wiatrem słonecznym a otaczającą materią międzygwiazdową. Ponieważ Słońce porusza się z prędkością dwudziestu kilku km/s względem lokalnego ośrodka międzygwiazdowego, heliosfera jest silnie asymetryczna, z nosem spłaszczonym w kierunku ruchu i ogonem wyciągniętym w kierunku przeciwnym.

Obszar graniczny między wiatrem słonecznym a materią galaktyczną składa się z warstw. Zgodnie z dotychczasowymi teoriami wyróżniano w nim trzy powierzchnie: końcową falę uderzeniową wiatru słonecznego, heliopauzę rozdzielającą wiatr słoneczny i materię międzygwiazdową oraz czołową falę uderzeniową powstającą w miejscu, w którym materia międzygwiazdowa zaczyna opływać heliosferę.

W świetle ostatnich obserwacji dwie niezależne grupy modelujące granice heliosfery stwierdziły, że w zakresie parametrów uzyskanych z IBEX-a nie ma fizycznych podstaw do formowania się czołowej fali uderzeniowej przed heliosferą. Zapewne powstaje tam coś podobnego do fali tworzącej się przed wolno płynącym statkiem. Zatem zjawiska na krańcach heliosfery rządzone są innymi prawami, niż sądzono.

Oddziaływanie Słońca z materią galaktyczną



CBK PAN, Proj. graf. M.A. Kubiak, M. Frolow, Tatars

Heliosfera ze swoim obszarem granicznym (wizja artystyczna)

IBEX mierzy strumienie energetycznych atomów neutralnych wodoru (H ENA) powstające poza szokiem końcowym, w wewnętrznej warstwie obszaru granicznego heliosfery. Rozkład cząstek obserwowany na orbicie Ziemi jest różny od rozkładu u źródła. Dzieje się tak z powodu strat wskutek procesów jonizacyjnych, jakich doznają cząstki, przemierzając Układ Słoneczny. Zespół warszawski odpowiedzialny jest za modelowanie czynników jonizujących ENA i wylicza prawdopodobieństwa przeżycia atomów od źródła do detektora. Prawdopodobieństwa te pozwalają wprowadzić poprawkę do obserwowanego strumienia i uzyskać mapy nieba miejsc, gdzie H ENA powstają.

Który to obłok?

Poza tworzeniem pełnych map granicy heliosfery IBEX rejestruje cząstki pochodzące spoza heliosfery, z lokalnego ośrodka międzygwiazdowego. Aby poznać warunki, jakie w nim panują, należy wyznaczyć kierunek i prędkość napływu oraz temperaturę gazu. IBEX zmierzył je na nowo – prędkość okazała się mniejsza, niż sądzono. Wyniki pozornie niewiele różnią się od wcześniejszych, jednakże zmiany te doprowadziły do poważnej rewizji poglądów na budowę warstwowej struktury granicy heliosfery.

Mniejsza prędkość napływu gazu oznacza, że mniejsze jest ciśnienie wywierane przez

materię galaktyczną na heliosferę. Jako że rozmiary heliosfery są wynikiem równowagi między ciśnieniem wywieranym przez wiatr słoneczny i ciśnieniem zewnętrznym od lokalnego ośrodka międzygwiazdowego, to być może rozmiary i kształt heliosfery są inne, niż sądzono.

Słońce wraz z Układem Słonecznym zdaje się poruszać w materii, będącej pozostałością po serii wybuchów supernowych sprzed kilku milionów lat, określanej jako Lokalny Bąbel. Jest on gorący i zjonizowany, ale zawiera też chłodne i nie w pełni zjonizowane obłoki materii. Właściwości materii obłoku, przez który właśnie przechodzi Słońce, wpływają na kształt heliosfery. Pomiar spektroskopowe sugerowały, że Słońce może się znajdować w jednym z dwóch pobliskich obłoków, blisko granicy obłoku. Prędkość względną tego obłoku i Słońca szacowano na 25 km/s. Sąsiedni obłok, zwany Obłokiem-G, porusza się względem Słońca nieco szybciej. Nie można było jednak wykluczyć, że Słońce porusza się na granicy tych dwóch obłoków, a może nawet stanowią one jedną kłębiącą się chmurę. Natomiast wyniki IBEX-a wskazują, że Słońce i Obłok Lokalny poruszają się względem siebie wolniej, niż przypuszczano, i choć Słońce istotnie znajduje się tuż przy granicy obłoku, to jednak jest on oddzielny od swego sąsiada, a materia w nim wydaje się zaskakująco jednorodna.

Wstęga

Przed uzyskaniem pierwszego obrazu nieba spodziewano się, że emisja ENA będzie dwubiegunowa, silniejsza z kierunku nosa heliosfery i słabsza z kierunku ogona. IBEX pokazał, że rozkład ten jest odmienny: na tle z grubsza dwubiegunowego rozkładu sygnału na całym niebie dominuje emisja przypominająca kształtem łukowatą wstęgę. Widać ją we wszystkich zakresach energetycznych IBEX-a, a jej struktura ewoluuje w czasie. Do tej pory nikt nie zdołał zrozumieć, jakie zjawisko jest odpowiedzialne za ów dziwny twór.

Najbardziej prawdopodobne wydają się dwie hipotezy. Prof. Stanisław Grzędzielski z CBK PAN zaproponował teorię, według której wstęga powstaje na granicy dwóch obłoków, przy której Układ Słoneczny akurat się znajduje. Konkurencyjne teorie mówią, że powstawanie wstęgi związane jest z polem magnetycznym tuż za szokiem końcowym i wielokrotną wymianą ładunku między atomami a jonami w obszarze granicznym heliosfery. Wszystkie te hipotezy mają jednak trudne do usunięcia słabości.

Zatem jakie są oddziaływania Słońca i materii galaktycznej? Na razie nie znamy odpowiedzi innej niż „nie takie, jak przypuszczano”. Aby móc odpowiedzieć na to pytanie, potrzeba czasu, obserwacji, modelowania i cierpliwości.

Więcej wyobraźni!

Heliosfera jest dla Układu Słonecznego tym, czym dla Ziemi magnetosfera, czyli tarczą ochronną przed promieniowaniem kosmicznym. Słońce w swojej wędrówce przez Galaktykę przechodzi przez materię międzygwiazdową o zmiennych parametrach. Heliosfera zmienia kształt i rozmiar wraz ze zmianami warunków w otaczającej ją materii i w takt tych zmian zmienia się poziom promieniowania kosmicznego docierającego do Ziemi.

IBEX postawił przed uczonymi wiele intrygujących pytań, na które wciąż nie potrafimy znaleźć jednoznacznej odpowiedzi. Wygląd heliosfery jest inny, niż przypuszczaliśmy. Galaktyczne otoczenie Słońca również jest nieco inne, niż się wydawało. Niewykluczone, że niebawem Układ Słoneczny będzie przechodził przez granicę dwóch obłoków międzygwiazdowych. Wciąż nie starcza nam wyobraźni, by ogarnąć więcej niż czubek na-

szego ziemskiego nosa. Zaskakujące odkrycia IBEX-a udowodniły, że człowiek nadal niewiele wie o najbliższym otoczeniu Słońca. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Autorka tekstu pragnie podziękować dr. hab. M. Bzowskiemu i prof. dr. hab. S. Grzędzielskiemu za inspiracje i komentarze.

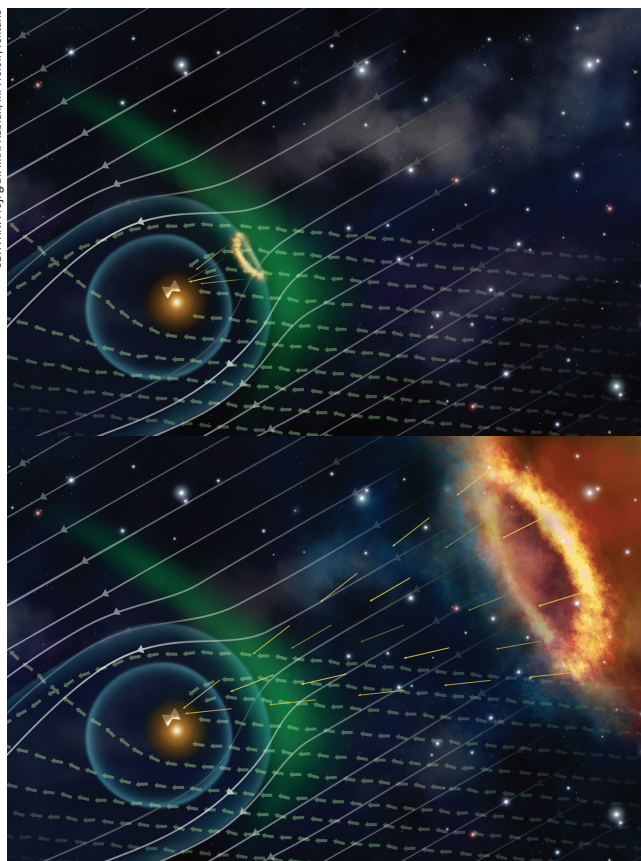
McComas D., Allegrini F., Bochsler P., Bzowski M., Christian E.R., DeMajistre R., Fahr H., Fichrner H., Frisch P.C., Funsten H.O., Fuselier S.A., Gloeckler G., Gruntman M., Heerikhuisen J., Izmodenov V., Janzen P., Knappenberger P., Krimigis S., Kucharek H., Lee M.A., Livadiotis G., Livi S., MacDowall R.J., Mitchell D., Möbius E., Moore T., Pogorelov N.V., Reisenfeld D., Roelof E., Saul L., Schwadron N.A., Valek P.W., Vanderspek R., Wurz P., Zank G.P. (2009). Global observations of the interstellar interaction from the Interstellar Boundary Explorer (IBEX). *Science*, 326, 959-962.

Grzędzielski S., Bzowski M., Czechowski A., Funsten H.O., McComas D.J., Schwadron N.A. (2010). A possible generation mechanism for the IBEX ribbon from outside the heliosphere. *Ap.J.Lett.*, 715, L84-L87.

Bzowski M., Kubiak M.A., Möbius E., Bochsler P., Leonard T., Heirtzler D., Kucharek H., Sokół J.M., Hłond M., Crew G.B., Schwadron N.A., Fuselier S.A., McComas D.J. (2012). Neutral interstellar helium parameters based on IBEX-Lo observations and test particle calculations. *Ap.J.Suppl.Series*, 198:12.

McComas D.J., Alexashov D., Bzowski M., Fahr H.J., Heerikhuisen J., Izmodenov V., Lee M.A., Möbius E., Pogorelov N., Schwadron N.A., Zank G.P. (2012). The heliosphere's interstellar interaction: no bow shock. *Science*, 336, 1291-1293.

Dwie konkurencyjne hipotezy pochodzenia wstęgi odkrytej przez IBEX-a: powstaje ona lokalnie tuż na granicy heliosfery (panel górny) lub na granicy sąsiadujących obłoków międzygwiazdowych (panel dolny)



CBK PAN, Proj. graf. M.A. Kubiak, M. Frolow, T. Tenti