



**MODULATION OF SELECTED SPECIES OF NEUTRAL INTERSTELLAR GAS  
AND THEIR DERIVATIVE POPULATIONS IN THE HELIOSPHERE DUE TO  
SOLAR ACTIVITY CYCLE EFFECTS**

JUSTYNA M. SOKÓŁ

Supervisor:

Dr. habil. Maciej Bzowski

Associate Professor in SRC PAS

A thesis submitted for the degree of Doctor of Philosophy in Physics

Space Research Centre  
Polish Academy of Sciences

Warsaw 2016

## Streszczenie

Heliosfera powstaje w wyniku oddziaływania materii pochodzącej ze Słońca z otaczającą Słońce lokalną materią międzygwiazdową. Oddziaływanie to kształtowane jest częściowo przez korpuskularne i elektromagnetyczne promieniowanie ze Słońca oraz jego pole grawitacyjne i magnetyczne. Przyjmuje się, że otaczająca heliosferę materia międzygwiazdowa jest jednorodna i stacjonarna co najmniej na przestrzeni rozmiaru heliosfery, podczas gdy materia pochodząca ze Słońca zmienia się w czasie i w przestrzeni. W fizyce heliosfery w skalach globalnych istotne są zmienności materii emitowanej ze Słońca w skalach czasowych rzędu długości cyklu aktywności słonecznej, jak również w skalach dłuższych i krótszych.

W wyniku oddziaływania plazmy słonecznej z plazmą międzygwiazdową powstają różne populacje cząstek zjonizowanych i neutralnych. Należą do nich atomy energetyczne (ENA, z ang. energetic neutral atom) oraz jony pochwycone (PUI, z ang. pick-up ion), które wraz z atomami międzygwiazdowymi kształtują heliosferę. Obserwacje tych trzech typów cząstek w heliosferze stanowią podstawowe narzędzie do badania heliosfery i jej granic. Powstawanie ENA i PUI oraz ich rozkład w heliosferze modulowane są poprzez jonizację przez wiatr słoneczny i promieniowanie ultrafioletowe ze Słońca. Główne czynniki modulujące to szybkość i gęstość wiatru słonecznego, strumień promieniowania w zakresie skrajnego ultrafioletu (EUV) w zakresie odpowiedzialnym za jonizację (długości fali poniżej  $\sim 91$  nm), linia Lyman- $\alpha$  (121.6 nm), oraz temperatura elektronów w wietrze słonecznym. Istotna jest zmienność materii pochodzącej ze Słońca wraz z cyklem słonecznym zarówno w skalach czasowych, jak i przestrzennych.

Jonizacja wewnątrz heliosfery powoduje powstawanie nowych populacji cząstek oraz modyfikacje populacji już istniejących. Jonizacja może być realizowana poprzez wymianę ładunku z cząstkami wiatru słonecznego, fotojonizację oraz zderzenia z elektronami wiatru słonecznego. Tworzenie populacji cząstek w heliosferze jest hierarchiczne. Pierwotne populacje to neutralny gaz międzygwiazdowy, który wniknął do wnętrza heliosfery oraz wiatr słoneczny. Jonizacja gazu międzygwiazdowego wewnątrz heliosfery prowadzi do powstania jonów pochwyconych, a w przypadku wymiany ładunku dodatkowo atomów energetycznych. Populacje te ulegają kolejnym stratom jonizacyjnym, tworząc kolejne populacje cząstek. Efektywność produkcji nowych populacji zależy od rozkładu szybkości cząstek oraz od intensywności czynników jonizacyjnych.

W dotychczasowych badaniach efekty modulacji populacji cząstek heliosferycznych poprzez jonizację pochodzącą od Słońca były uwzględniane w uproszczony sposób. Powodem stosowania uproszczeń był brak spójnego, jednorodnego modelu czynników słonecznych odpowiedzialnych za jonizację. Pierwsze wyniki pokazały, że dokładne śledzenie historii zmienności jonizacji na drodze cząstki w heliosferze może mieć istotne znaczenie dla uzyskiwanych wyników.

Początkowo brakowało wystarczającej liczby dostępnych danych pomiarowych czynników słonecznych. Następnie wykorzystywano pojedyncze pomiary do konstruowania bardzo przybliżonej zmienności w czasie, jednakże uniemożliwiała ona śledzenie zmienności na drobnych skalach czasowych (np. w skali obrotu Słońca) w długim przedziale czasu. Ponadto z uwagi na przekonanie, że największe starty jonizacyjne mają miejsce tuż przed detekcją, często pomijano śledzenie histo-

rii jonizacji atomów na ich trajektoriach w heliosferze, przyjmując że jest ona mało znacząca. Na przełomie XX i XXI wieku liczba dostępnych danych pomiarowych wzrosła, jednak pochodziły one z różnych źródeł i stworzenie jednolitego w czasie szeregu czynników jonizacyjnych wymagało ich skalibrowania i unormowania.

Wzrost dostępnych danych pomiarowych związanych z wiatrem słonecznym, bezpośrednich i pośrednich, oraz bezpośrednie pomiary widma promieniowania słonecznego w zakresie EUV wraz z powstaniem skalibrowanych serii kompozytowych wskaźników (ang. proxies) promieniowania EUV umożliwiły zbudowanie jednolitego w czasie zbioru czynników słonecznych modulujących gaz międzygwiazdowy w heliosferze na przestrzeni ostatnich cykli słonecznych. Spójny, jednorodny i wystarczająco długi w czasie szereg czynników jonizacyjnych mógł być następnie zaimplementowany do istniejących modeli rozkładu gazu międzygwiazdowego w heliosferze oraz zastosowany do interpretacji obserwacji z misji kosmicznych w tym w szczególności z sondy IBEX.

Przedmiotem prezentowanej rozprawy doktorskiej jest modulacja wybranych pierwiastków gazu międzygwiazdowego i jego populacji pochodnych w heliosferze w wyniku efektów związanych z cyklem aktywności słonecznej. W ramach przeprowadzonej analizy

- wypracowano jednorodny, spójny i oparty na obserwacjach model czynników jonizacyjnych w heliosferze
- zbadano wpływ jonizacji na gęstości międzygwiazdowych atomów He, Ne, O widziane z orbity Ziemi
- zbadano, czy efekty jonizacyjne mogą znacząco wpłynąć na wyznaczanie kierunku napływu gazu międzygwiazdowego z pomiarów PUIs
- oszacowano, na ile możliwe jest obserwacyjne poszukiwanie odstępstw neutralnej populacji międzygwiazdowej od stanu równowagi termodynamicznej poprzez obserwacje prowadzone z orbity Ziemi
- zbadano modyfikację strumieni H ENA wskutek zmienności jonizacji w czasie i szerokości heliograficznej.

Realizacja postawionego tematu i wynikające z niej wnioski przedstawione są w następujących dziewięciu artykułach opublikowanych w recenzowanych czasopismach naukowych. Kolejność artykułów, które stanowią rozprawę, odpowiada kolejności realizacji postawionych zadań:

Artykuł **S1 Sokół, J. M.**, Bzowski, M., Tokumaru, M., Fujiki, K., McComas, D. J., 2013, *Heliolatitude and time variations of solar wind structure from in-situ measurements and interplanetary scintillation observations*, Solar Physics, vol. 285, pp. 167-200, DOI:10.1007/s11207-012-9993-9; (Sokół et al. 2013b)

Artykuł **S2 Sokół, J. M.**, Swaczyna, P., Bzowski, M., Tokumaru, M., 2015c, *Reconstruction of heliolaritudinal structure of the solar wind proton speed and density*, Solar Physics, vol. 290, pp. 2589-2615, DOI:10.1007/s11207-015-0800-2; (Sokół et al. 2015d)

- Artykuł **B1** Bzowski, M., **Sokół, J. M.**, Tokumaru, M., Fujiki, K., Quèmerais, E., Lallement, R., Ferron, S., Bochsler, P., McComas, D. J., 2013b, *Solar parameters for modeling the interplanetary background*, Chapter 3 in “Cross-Calibration of Far UV Spectra of Solar System Objects and the Heliosphere”, ISSI Scientific Report Series 13, ed. E. Quèmerais, M. Snow, R.-M. Bonnet, Springer Science + Business Media, New York, pp. 67-138, DOI:10.1007/978-1-4614-6384-9\_3; (Bzowski et al. 2013b)
- Artykuł **B2** Bzowski, M., **Sokół, J. M.**, Kubiak, M. A., Kucharek, H., 2013a, *Modulation of neutral interstellar He, Ne, O in the heliosphere: survival probabilities and abundances at IBEX*, *Astronomy & Astrophysics*, vol. 557, A50, DOI:10.1051/0004-6361/201321700; (Bzowski et al. 2013a)
- Artykuł **S3** **Sokół, J. M.**, Bzowski, M., Kubiak, M. A., Möbius, E., 2016, *Solar cycle variation of interstellar neutral He, Ne, O density and pick-up ions along the Earth’s orbit*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 458, Issue 4, pp. 3691-3704, DOI:10.1093/mnras/stw515; (Sokół et al. 2016)
- Artykuł **S4** **Sokół, J. M.**, Kubiak, M. A., Bzowski, M., Swaczyna, P., 2015b, *Interstellar neutral helium in the heliosphere from Interstellar Boundary Explorer observations. II. The Warsaw Test Particle Model (WTPM)*, *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 220:27 (24pp), DOI:10.1088/0067-0049/220/2/27; (Sokół et al. 2015c)
- Artykuł **S5** **Sokół, J. M.**, Bzowski, M., Kubiak, M. A., Swaczyna, P., Galli, A., Wurz, P., Möbius, E., Kucharek, H., Fuselier, S. A., McComas, D. J., 2015a, *The interstellar neutral He haze in the heliosphere: what can we learn?*, *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 220:29 (12pp), DOI:10.1088/0067-0049/220/2/29; (Sokół et al. 2015b)
- Artykuł **M1** McComas, D. J., Dayeh, M. A., Allegrini, F., Bzowski, M., DeMajistre, R., Fujiki, K., Funsten, H. O., Fuselier, S. A., Gruntman, M., Janzen, P. H., Kubiak, M. A., Kucharek, H., Livadiotis, G., Möbius, E., Reisenfeld, D. B., Reno, M., Schwadron, N. A., **Sokół, J. M.**, Tokumaru, M., 2012, *The first three years of IBEX observations and our evolving heliosphere*, *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 203:1 (36pp), DOI:10.1088/0067-0049/203/1/1; (McComas et al. 2012)
- Artykuł **M2** McComas, D. J., Allegrini, F., Bzowski, M., Dayeh, M. A., DeMajistre, R., Funsten, H. O., Fuselier, S. A., Gruntman, M., Janzen, P. H., Kubiak, M. A., Kucharek, Möbius, E., Reisenfeld, D. B., Schwadron, N. A., **Sokół, J. M.**, Tokumaru, M., 2014, *IBEX: The First Five Years (2009–2013)*, *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 213:20 (28pp), DOI:10.1088/0067-0049/213/2/20; (McComas et al. 2014a).

Artykuł S1 przedstawia wypracowany fenomenologiczny model ewolucji czasowej i przestrzennej wiatru słonecznego. Do jego konstrukcji wykorzystano dane zgromadzone w bazie OMNI, zebrane z bezpośrednich pomiarów wykonywanych w płaszczyźnie ekliptyki, oraz jedyne dostępne

bezpośrednie dane o wietrze słoneczny spoza płaszczyzny ekliptyki, zebrane przez sondę Ulysses. Zbiór danych uzupełniono o dane z szybkością wiatru słonecznego, uzyskane z obserwacji scyntylacji międzyplanetarnych, przygotowywane i udostępnione przez ISEE<sup>1</sup>. Model ten został rozwinięty w Artykule S2. Opracowany model ewolucji struktury wiatru słonecznego posłużył następnie m.in. do szacowania temp wymiany ładunku między populacjami cząstek w heliosferze oraz jonizacji poprzez zderzenia z elektronami w wietrze słonecznym.

Aby oszacować tempo jonizacji poprzez promieniowanie ultrafioletowe ze Słońca, przeanalizowano dostępne pomiary widma EUV Słońca oraz jego wskaźników. Odpowiednio dobrano dane kierując się ich odpowiednością, jednolitością oraz zakresem dostępności czasowej. Skonstruowano kompozytowy model fotojonizacji pierwiastków helu, neonu, tlenu i wodoru w heliosferze. Wyniki przedstawione są w Artykule B2 oraz, dla wodoru, w Artykule B1.

Obydwa opracowane modele posłużyły do oszacowania całkowitego tempa jonizacji neutralnej składowej gazu międzygwiazdowego w heliosferze, jak również populacji jonów pochwyconych oraz atomów energetycznych wodoru z wykorzystaniem modeli rozkładu gazu rozwijanych w *Zakładzie Fizyki Układu Słonecznego i Astrofizyki* (ZFUSiA) od lat 1990-tych. Artykuł B2 oraz Artykuł S3 prezentują modulację gęstości, strumieni, obfitości oraz jonów pochwyconych He, Ne i O w heliosferze wskutek strat jonizacyjnych wewnątrz heliosfery. Wyniki pokazują, że zmiany tempa jonizacji związane z cyklem aktywności słonecznej mogą znacząco modyfikować rozkłady gęstości atomów międzygwiazdowych. Śledzenie zmian czasowych jonizacji wzdłuż trajektorii cząstki w heliosferze jest konieczne do precyzyjnego badania pierwiastków neonu i tlenu oraz wodoru. Modulacja He jest najmniejsza spośród badanych pierwiastków, najbardziej tłumiony w heliosferze jest tlen i wodór. Rozkład wodoru jest dodatkowo modulowany przez zmienne w czasie efektywne działanie ciśnienia promieniowania w wodorowej linii Lyman- $\alpha$ , jednakże efekty te znane są w literaturze i nie były przedmiotem badań, choć uwzględniono je w wykonywanych rachunkach. Efekty zmienności temp jonizacji z szerokością heliograficzną są istotne w badaniu tlenu i mogą prowadzić do systematycznych przesunięć w położeniu ekstremów gęstości wzdłuż orbity Ziemi.

Zmienności gęstości atomów międzygwiazdowych w płaszczyźnie orbity Ziemi są istotne m.in. do badania temp produkcji jonów pochwyconych, powstających w procesie jonizacji atomów międzygwiazdowych, oraz do szacowania obfitości pierwiastków wewnątrz heliosfery i w jej warstwach zewnętrznych. W Artykule S3 prezentowane są tempa lokalnej produkcji oraz przewidywane tempa zliczeń jonów pochwyconych He, Ne i O. Wyniki wskazują, że zmienność rozkładu międzygwiazdowego gazu neutralnego w pobliżu orbity Ziemi, wskutek zmienności temp jonizacji w czasie i szerokości heliograficznej, może znacząco modyfikować rejestrowany strumień jonów pochwyconych. Modyfikacja ta prowadzi do przesunięcia położenia maksimów w rozkładach obserwowanych bezpośrednio wzdłuż orbity Ziemi, które używane są do wyznaczenia kierunku napływu gazu międzygwiazdowego na heliosferę. W efekcie dochodzi do złudzenia, że gaz międzygwiazdowy napływa z kierunku przesuniętego o kilka stopni. Czynniki odpowiedzialne za modulację modelowanych wielkości badane były ze szczególną uwagą poświęconą ich modyfikacji wskutek jonizacji w

---

<sup>1</sup>Institute for Space-Earth Environmental Research, Nagoya University, Japonia

po bliziu Słońca. Odkryto, że głównym powodem systematycznego przesunięcia kierunku napływu gazu międzygwiazdowego, otrzymywanego z jonów pochwyconych, jest modulacja rozkładu macierzystego gazu międzygwiazdowego wzdłuż orbity Ziemi w trakcie cyklu słonecznego. Krótkotrwałe zmienności w tempie produkcji jonów pochwyconych są odpowiedzialne za dodatkowy roczny rozrzut i powiększają obserwowane różnice. Kierunek różnic między wartościami oczekiwanymi a otrzymanymi zgadza się w obrębie wszystkich trzech badanych pierwiastków (He, Ne, O), i jest w stronę większych długości dla tzw. półksiężycy (ang. crescent, wzrost obserwowanych wartości po stronie napływu gazu względem Słońca), natomiast dla tzw. stożka (ang. cone, wzrost obserwowanych wartości po stronie spływu gazu względem Słońca wskutek grawitacyjnego zakrzywienia trajektorii cząstek) kierunek różnic jest w kierunku przeciwnym. Wyniki te wskazują, że najbardziej prawdopodobnym wyjaśnieniem systematycznych różnic w wyznaczonym kierunku napływu gazu międzygwiazdowego do heliosfery z obserwacji jonów pochwyconych jest zaniedbanie w oryginalnej analizie danych modulacji gazu międzygwiazdowego wewnątrz heliosfery spowodowanej aktywnością słoneczną.

Znając prawdopodobieństwa przeżycia atomów międzygwiazdowych w heliosferze można wypracować czynniki określające zmianę względnych stosunków He, Ne i O wskutek jonizacji wywołanej promieniowaniem korpuskularnym i elektromagnetycznym ze Słońca. Zastosowanie ich do strumieni tych pierwiastków zmierzonych z okoli orbity Ziemi umożliwia oszacowanie obfitości na szoku końcowym, a po uwzględnieniu filtracji w otoku heliosferycznym, również obfitości w lokalnym ośrodku międzygwiazdowym. Wpływ zmiennej w czasie jonizacji na takie oszacowania przedstawiony jest w Artykule B2. Dyskutowana jest w nim również zależność obfitości Ne/He, O/He i Ne/O, od parametrów gazu międzygwiazdowego napływającego do heliosfery. Wyniki pokazują, że najbardziej zmienne w cyklu słonecznym są stosunki prawdopodobieństw przeżycia Ne/He i O/He, natomiast Ne/O wykazuje zmienność zdominowaną przez kilkuletnie zmiany w strumieniu wiatru słonecznego w płaszczyźnie ekliptyki. Stosunki prawdopodobieństw przeżycia dla badanych pierwiastków zmieniają się również z parametrami gazu międzygwiazdowego napływającego do heliosfery. Dla stosunków Ne/He i O/He maleją ze wzrostem wartości długości kierunku napływu i spadkiem szybkości gazu, natomiast dla stosunku Ne/O rosną ze wzrostem zarówno wartości długości kierunku napływu, jak i szybkości gazu.

W sytuacji, gdy czynniki jonizacyjne pochodzące ze Słońca wewnątrz heliosfery są już dobrze poznane i kontrolowane oraz dane są w postaci kompletnego, jednorodnego i ciągłego w czasie modelu, można zastosować je do modelowania gazu międzygwiazdowego w zakresie wykraczającym poza dotychczas przyjmowane standardowe założenia. Artykuł S5 przedstawia analizę helowej składowej neutralnego gazu międzygwiazdowego w heliosferze przy różnych założeniach o funkcji rozkładu gazu przed heliosferą. Skonstruowane zostały mapy pełnego nieba sygnału pochodzącego od gazu z rozkładem zadanym przez funkcję kappa, pojedynczą funkcję Maxwella-Boltzmannna oraz sumę dwóch rozkładów Maxwella-Boltzmannna osobno dla populacji pierwotnej i Ciepłej Bryzy, czyli niedawno odkrytej populacji gazu międzygwiazdowego w heliosferze, która prawdopodobnie jest tzw. wtórną populacją neutralnego gazu międzygwiazdowego w heliosferze, powstającą w zewnętrznym otoku. Następnie porównano je jakościowo z danymi. Celem była identyfikacja obszarów na niebie,

w których efekty pochodzące od niestandardowych założeń byłyby najbardziej widoczne. Wnioski wskazują, że spodziewane sygnatury byłyby możliwe do detekcji, jednakże wymagana jest większa czułość energetyczna detektora niż ta, którą dysponuje IBEX-Lo. Ponadto interesujące obszary na niebie znajdują się w tych częściach orbity IBEXa, które są przysłonięte przez magnetosferę Ziemi. Na potrzeby tych oszacowań rozwinięto analityczną wersję oprogramowania do badania rozkładu gazu międzygwiazdowego w heliosferze używanego w ZFUSiA, tzw. Warsaw Test Particle Model (WTPM), szczegóły przedstawione są w Artykule S4. Analityczna odmiana WTPM przeznaczona jest do używania na komputerach osobistych i doskonale sprawdza się w jakościowych oszacowaniach, gdyż nie wymaga zaawansowanych zasobów obliczeniowych.

Opracowane tempa jonizacji gazu międzygwiazdowego wewnątrz heliosfery posłużyły również do oszacowania strat jonizacyjnych strumieni atomów energetycznych wodoru (H ENA) obserwowanych przez instrument IBEX-Hi na pokładzie sondy IBEX. Jonizacja wewnątrz heliosfery jest różnicowa co doprowadza do istotnej modyfikacji funkcji rozkładu obserwowanych strumieni. Prawdopodobieństwa przeżycia są różne dla cząstek o różnych energiach, a zatem znacząco modyfikują widma energetyczne rejestrowanych strumieni. Dodatkowo materia jonizująca wewnątrz heliosfery (wiatr słoneczny) wykazuje anizotropię w szerokości heliograficznej, tym samym jonizacja również jest anizotropowa. Prowadzi to do odmiennej modyfikacji strumieni H ENA w heliosferze w zależności od kierunku obserwacji. Prawdopodobieństwa przeżycia H ENA posłużyły do wyznaczenia strumieni tych populacji w miejscu ich pochodzenia, czyli w powłoce heliosferycznej. W obszarze tym dochodzi do oddziaływania materii pochodzącej ze Słońca z materią lokalnego ośrodka międzygwiazdowego, która opływając heliosferę staje się anizotropowa. ENA są wskaźnikami stanu fizycznego plazmy oraz procesów i przepływów zachodzących w tych zewnętrznych obszarach heliosfery. Prawdopodobieństwa przeżycia poprawnie uwzględniające anizotropię środowiska jonizacyjnego wewnątrz heliosfery są niezbędne do odfiltrowania tych efektów w obserwacjach i wiarygodnego oszacowania anizotropii materii w zewnętrznych obszarach heliosfery. Dokładna analiza prawdopodobieństw przeżycia użytych do korekcji zmierzonych strumieni H ENA opisana jest w Artykułach M1 i M2.

Globalny obraz heliosfery i procesów zachodzących w jej zewnętrznych warstwach badany jest na podstawie obserwacji prowadzonych z okolic orbity Ziemi. Warunki jonizacyjne panujące wewnątrz heliosfery mają istotny wpływ na analizę tych obserwacji i poprawną ich interpretację. W przedstawianej rozprawie doktorskiej wykazano, że uwzględnienie jonizacji oszacowanej ze starannie zestawionych dostępnych danych obserwacyjnych i tworzącej spójny system ma znaczący wpływ na analizę obserwacji populacji cząstek międzygwiazdowych wewnątrz heliosfery. Przedstawione wnioski dotyczą zarówno składowej neutralnej, jak i zjonizowanej gazu międzygwiazdowego, jak również mogą mieć również wpływ na interpretację obserwacji heliosferycznej poświaty wodorowej i helowej.