

Złożone cząsteczki w materii międzygwiazdnej

Prażródło cząsteczek



JACEK KREŁOWSKI

Centrum Astronomii

Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

jacek@astri.uni.torun.pl

Prof. dr hab. Jacek Krelowski z Centrum Astronomii

UMK zajmuje się badaniami cząsteczek

z obłoków materii międzygwiazdnej

Od czego tak naprawdę należałoby rozpocząć Księgę Genesis? Trudno sprzeczać się o priorytet nieba w dziele stworzenia, ale jak powstała Ziemia?

Wiemy dziś na pewno, że nasza planeta, tak jak cały Układ Słoneczny, to nie jest pierwsza generacja obiektów Wszechświata. Rację miał Walt Whitman, kiedy pisał, że każde źdźbło trawy to efekt ciężkiej harówki gwiazd. Nie ulega bowiem wątpliwości, że atomy, z których jesteśmy zbudowani, wchodziły onegdaj w skład co najmniej czterech różnych gwiazd. Ziemia powstała już z materii znacznie wzbogaconej w pierwiastki cięższe od wodoru i helu, ale czy tylko to miało znaczenie dla uczynienia jej gościnnym miejscem dla życia, które znamy?

Słońce i rówieśne mu gwiazdy powstawały z niezmiernie rozproszonej materii, która w postaci obłoków wypełnia przestrzeń pomiędzy gwiazdami. Ten ośrodek zawierał materię przetworzoną w jądrach gwiazd starszych generacji, wzbogaconą przede wszystkim w pierwiastek życia – węgiel, ale czy tylko to miało znaczenie dla powstania życia na naszej planecie?

Zagadka rozmytych linii

Przełom lat 30. i 40. ubiegłego stulecia przyniósł odkrycie pierwszych pozaziemskich molekuł organicznych. Grupa obserwatorów z Obserwatorium Mt. Wilson pod kierunkiem Paula Merrilla odkryła w widmach niektórych gwiazd bardzo wąskie struktury widmowe. Zostały one następnie przez Paula Swingsa i Andrew McKellara zidentyfikowane jako linie powstałe w prostych molekułach: CH, CN i CH⁺. Te niezwykle reaktywne rodniki organiczne istnieją w obłokach międzygwiazdowych z racji niesłychanego rozrzedzenia materii w tych środowiskach. Dość powiedzieć, że średnia gęstość takich obłoków to 10 atomów wodoru na cm³; dla porównania – w powietrzu, którym oddychamy, w cm³ cząsteczek jest 10¹⁹. Nasza wyobraźnia takiej rozpiętości nie obejmuje!

Galaktyka Sombrero:
Rozmieszczenie materii międzygwiazdowej w innych galaktykach przedstawia zdjęcie z Teleskopu Kosmicznego Hubble'a



NASA/PE Carilli and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

Kiedy jednak astrofizycy odkrywali pierwsze molekuly międzygwiazdowe, w tle czała się już zagadka, która słusnie nosi dziś miano najbardziej długowiecznej w historii spektroskopii. Już bowiem w 1922 r. Mary Lea Heger dostrzegła dwie struktury spektralne, określone mianem stacjonarnych w widmie gwiazdy spektroskopowo podwójnej. Linie powstające w atmosferach takich gwiazd oscylują w pewnym zakresie, ilustrując znakomicie efekt Dopplera. Nieco później wspomniany już Paul Merrill ze współpracownikami dowiedli, że struktury stacjonarne są międzygwiazdowymi, ale te wykryte w 1922 r. mają dziwnie szerokie profile. Linie atomów i prostych molekuł powstające w tym ośrodku są niesłychanie wąskie, tymczasem dostrzeżone linie czy też pasma wykazywały znaczne rozmycie, zresztą zróżnicowane. Tak pojawił się problem pochodzenia *rozmytych linii międzygwiazdowych* – zagadka, która skutecznie unika rozwiązania od prawie 90 lat. Od tej pory jedynie liczba zaobserwowanych struktur tego rodzaju wzrosła od dwóch w pracy Mary Heger do 414 w niedawnej publikacji grupy Lewisa Hobbsa. Tak więc widma obłoków międzygwiazdowych okazują się bogate w struktury absorpcyjne, ale informacja w nich zawarta pozostaje zakryta. Jakie mogą być nośniki tych zagadkowych struktur?

Identyfikacja cząsteczek

Propozycji wspomnianych nośników zgłoszono co niemiara, i to bardzo różnej wielkości. Najmniejszym był ujemny jon wodoru, odpowiedzialny skądinąd za kształt widma ciągłego Słońca, a największymi – ziarna pyłu międzygwiazdowego, czyli twory większe o 9 rzędów wielkości. Obecnie uważa się dość powszechnie, że rozmyte linie międzygwiazdowe to widmo złożonych molekuł. Proponuje się obsadzić w tej roli węglowodory liniowe, związki aromatyczne, a nawet fulereny ze słynną cząsteczką C_{60} na czele. Są to jednak nadal hipotezy; jednoznaczna identyfikacja ciągle badaczom umyka.

Ostatnie cztery dekady przyniosły identyfikację bardzo wielu złożonych cząsteczek międzygwiazdowych; jest ich obecnie znanych ponad 150. Te większe są zawsze związkami węgla, a więc molekułami organicznymi. Tu uwaga: znakomita większość identyfikacji molekuł dotyczy związków obecnych w szczególnie gęstych, często prestellarnych obłokach,



Mgławica Koński
Łeb: Słońce i inne gwiazdy powstają z obłoków ośrodka międzygwiazdowego, takich jak widoczny tu Koński Łeb

a poza tym identyfikacji tych dokonano na podstawie emisji tychże molekuł w zakresie mikrofalowym. Takie emisje charakteryzują jedynie molekuly o asymetrycznym rozkładzie ładunku wewnątrz (molekuly polarne); nie dają ich molekuly centrosymetryczne, jak np. najobfitsza we Wszechświecie molekula H_2 . Tak więc lista zidentyfikowanych dzięki obserwacjom mikrofalowym cząsteczek grzeszy efektem selekcji.

Dopiero niedawno (w latach 90. ubiegłego stulecia) eksperymentatorzy opanowali techniki uzyskiwania w laboratoriach widm złożonych molekuł w fazie gazowej. Wcześniej znana była technika tzw. izolacji matrycowej, kiedy to molekuly przed zbadaniem ich widma wmraża się w kryształ zbudowany z gazu szlachetnego. Umożliwia to analizę związków bardzo reaktywnych – gaz szlachetny uniemożliwia im wchodzenie w reakcje – ale metoda ta daje wyniki trudne do porównania z obserwacjami. Oddziaływania badanych związków z matrycami zmieniają długości fal badanych struktur i poszerzają ich profile. Tak więc do porównania danych eksperymentów i obserwacji potrzeba widm uzyskanych w fazie gazowej.

Porównując widma

Kiedy tylko widma takie się pojawiły, podjęto próby identyfikacji związków znanych już z obserwacji mikrofalowych. Widma szeregu węglowodorów liniowych uzyskane w laboratorium kierowanym przez Johna Maiera w Bazylei porównano z widmami uzyskanymi w kilku obserwatoriach przeze mnie i kolegów z mojej grupy badawczej. Wynik był rozczarowujący: ani jeden ze związków

Złożone cząsteczki w materii międzygwiazdnej

Za grzywą Konia
kryją się
młode gwiazdy



NASA, NOAO, ESA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

znanych skądinąd w przestrzeni nie okazał się nośnikiem którejkolwiek ze znanych linii rozmytych! Podobny wynik uzyskaliśmy, porównując widma związków aromatycznych z laboratorium NASA Ames w Kalifornii, kierowanego przez Farida Salame. To ostatnie było o tyle frustrujące, że związki aromatyczne w przestrzeni postulowane są z racji występowania kilku struktur widmowych w podczerwieni. Można je interpretować jako widmo mieszaniny wspomnianych związków. Aby jednak zidentyfikować konkretną molekułę, trzeba znaleźć jej widmo w zakresie widzialnym lub w ultrafiolecie. A tu pustka...

Rosnąca liczba rozmytych linii międzygwiazdowych ma związek z rozwojem technik obserwacyjnych; w szczególności z powszechnym zastosowaniem do rejestracji widm matryc CCD, co umożliwia uzyskiwanie coraz wyższego stosunku sygnału do szumu. Nie dziwi więc, że kolejne linie rozmyte, dorzucane do i tak długiej listy, to struktury bardzo słabe. Wyłuskiwanie takowych z „trawki” szumów jest zajęciem żmudnym i wymagającym stosowania dużych teleskopów, które zbierają bardzo dużo światła. Warto jeszcze wspomnieć, że rozmyte linie międzygwiazdowe pokrywają widzialny obszar widma i bliską podczerwień, a więc zakresy „tradycyjne”, dostępne obserwacjom naziemnym.

Polowanie na kation

Wiosną 2009 wykonaliśmy wraz z Gazim Galazutdinovem i Jurijem Bieleckim

serię obserwacji za pomocą VLT (Very Large Telescope) wyposażonego w znakomity spektrograf UVES. Aparatura znajduje się w Chile na szczycie góry Paranal i jest własnością European Southern Observatory, spółki europejskiej, do której Polska od pewnego czasu aspiruje, ale bez widocznych postępów. W obserwacjach tych położono szczególny nacisk na jak najwyższy stosunek sygnału do szumu. Obiekty zostały starannie dobrane; widma zbieramy już od 1993 r. i obecnie dysponujemy największą na świecie bazą danych. Są w niej widma kilkuset obiektów często uzyskane więcej niż jednym instrumentem. To ważne, bo pozwala uniknąć efektów instrumentalnych. Ale nawet takie obserwacje nie zawsze pozwalają zobaczyć bardzo słabe struktury. Przekonaliśmy się o tym, polując na kation hydroksylu (OH^+).

Molekuła ta była nieznaną aż do 2010 r., choć neutralny rodnik OH zaobserwowano już w latach 60. W 2010 r. odkryto ją na trzy sposoby. Friedrich Wyrowski ze współpracownikami z Instytutu Maksa Plancka dostrzegli mikrofalowe przejścia tego molekularnego kationu. Równolegle konsorcjum PRISMAS (należy do niego czworo Polaków, w tym i niżej podpisany) badające widma w dalekiej podczerwieni o dużej rozdzielczości z satelity Herschel dokonało podobnej identyfikacji. Wreszcie wspomniane widma z VLT i spektrografu UVES pozwoliły odszukać strukturę widmową OH^+ w bliskim ultrafiolecie. Aby uzyskać niebudzącą wąt-

pliwości identyfikację, uśredniliśmy widma wielu różnych gwiazd. Przedstawiona średnia to skutek 150 ekspozycji wielkim teleskopem! Takie tropienie słabych struktur widmowych jest, jak widać, skuteczne, ale wymaga wiele czasu – stosunek sygnału do szumu rośnie bowiem z pierwiastkiem kwadratowym z liczby ekspozycji.

Ten wynik zachęcił nas do powrotu do prób identyfikacji liniowych węglowodorów. W szczególności atrakcyjny wydał się kation dwuacetyleny HCCCH^+ , i to z dwóch powodów. Takiego związku można się spodziewać, gdyż jest to cząsteczka zbudowana z węgla – pierwiastka znanego z wchodzenia w zestaw skomplikowanych molekuł, i wodoru – najobfitszego pierwiastka we Wszechświecie. Jest to zarazem cząsteczka centrosymetryczna, a więc niedostępna obserwacjom w zakresie mikrofalowym. Sugestię, że takie cząsteczki mogą być odpowiedzialne za linie rozmyte, wysnuliśmy z faktu zmian profili niektórych z nich wraz ze zmianami temperatury rotacyjnej centrosymetrycznej molekuly C_2 .

Najpierw był obłok

Ponownie zastosowana technika uśredniania bardzo wielu widm dała kolejny ważny wynik – kosmiczne widmo kationu dwuacetyleny. Powstało ono z uśrednienia widma 150 ekspozycji! Widmo laboratoryjne kationu dwuacetyleny ma rozdzielczość wyższą o rząd wielkości od obserwacyjnej i nie jest wrażliwe na procesy, które poszerzają struktury widmowe w ośrodku międzygwiazdowym. Tak więc obie struktury, ta obserwowana i ta z laboratorium, zgadzają się co do centralnej długości fali i do całkowitej szerokości. Obserwowane pasmo jest stosunkowo szerokie – znacznie szersze niż np. linii CH czy CN albo linii pierwiastków, takich jak potas czy wapń – zaliczyć je więc wypada do rozmytych linii międzygwiazdowych. Wykrycie kationu dwuacetyleny to najprawdopodobniej pierwsza po blisko 90 latach identyfikacja rozmytej linii międzygwiazdowej.

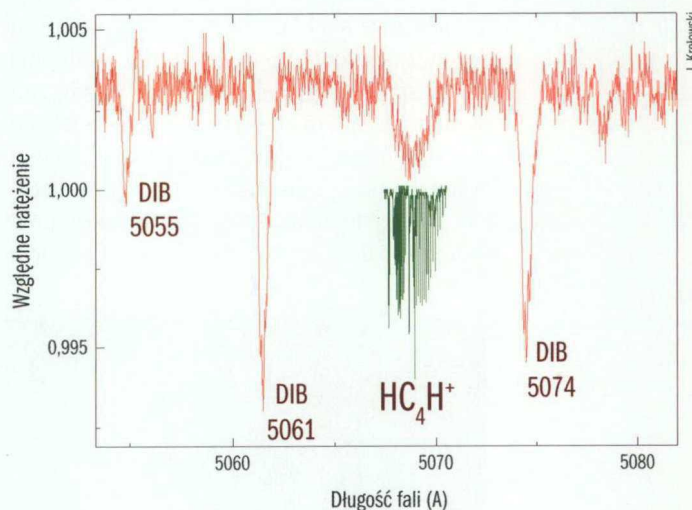
Strukturę dwuacetyleny udało się też znaleźć w widmie gwiazdy spektroskopowo podwójnej, znanej z silnych linii i pasm międzygwiazdowych. Pozostaje tam stacjonarna. Ogółem dostrzegliśmy ją w widmach z trzech różnych instrumentów, co wyklucza efekt instrumentalny, zawsze możliwy, kiedy

pomiary dotyczą struktur bardzo słabych. Wynik ten został też potwierdzony w niedawnych obserwacjach kanadyjskiej grupy astrofizyków pod kierunkiem Gordona Walkera. Byłoby rzeczą niezwykle ważną prześledzenie zachowania się struktury dwuacetyleny w różnych środowiskach, ale to wymaga uzyskania pojedynczych widm o jakości porównywalnej z naszą średnią. Przyjdzie chyba zatem na nie jeszcze poczekać...

Rok 2010 pozwolił więc wydłużyć listę znanych molekuł w obłokach nazywanych półprzezroczystymi (od ang. *translucent*) z tej racji, że wykrywa się je dzięki absorpcjom w widmach przeświecających przez nie gwiazd. W obłokach takich znaleziono do tej pory niewiele molekuł: H_2 , CO, OH, NH, CN, CH, CH^+ , C_2 i C_3 . Obecnie lista ta wydłuża się o dwa kationy: hydroksylu (OH^+) i dwuacetyleny.

Jak zatem należałoby rozpocząć Księgę Genesis? Zapewne – najpierw był obłok międzygwiazdowy, pełen molekuł (w większości organicznych), powodujących rozmyte linie międzygwiazdowe, potem z niego powstała nasza dzienna gwiazda, potem wokół niej planety i międzyplanetarna drobica, a potem – niech się martwią przedstawiciele innych dziedzin!

Słaba, szeroka struktura widmowa w uśrednionym widmie ze spektrografu UVES. Pod spodem – widmo laboratoryjne kationu dwuacetyleny



Chcesz wiedzieć więcej?

Krełowski J., Beletsky Y., Galazutdinov G.A., Kołos R., Gronowski M., LoCurto G. (2010). Evidence for diacetylene cation as the carrier of a diffuse interstellar band. *Astrophysical Journal Letters*, 714, 64.

Snow T.P., Tielens A.G.G.M., (1995). *The Diffuse Interstellar Bands*. Springer-Verlag GmbH.

<http://www.csa.com/discoveryguides/bands/review.pdf>