

Obszary zjonizowane a formowanie się gwiazd: wymuszona implozja

Miguel FIGUEIRA*

Tworzenie się gwiazd w galaktykach jest najczęściej przedstawiane jako zapadanie się masywnych chmur pyłu pod wpływem grawitacji. To uproszczone tłumaczenie jest jak najbardziej uzasadnione, jednak nie uwzględnia wszystkich procesów, jakie mogą mieć wpływ na powstawanie nowych obiektów gwiazdowych.

Czynnikami pobudzającym ośrodek międzygwiazdowy do tworzenia nowych gwiazd mogą być... młode gwiazdy. Emitują one silne promieniowanie UV, tworząc wokół siebie obszary zjonizowanego pyłu (H II). W artykule *Collect and Collapse: obszary zjonizowane a formowanie się gwiazd* (Δ_{20}^{12}) opisałem proces powstawania gwiazd związany z rozszerzaniem się takich zjonizowanych obszarów. Tym razem chciałbym skupić się na procesie tworzenia się gwiazd w chmurze pyłu podlegającej jonizacji.

Jeżeli chmura pyłu znajduje się blisko młodej (nowo powstałej) gwiazdy, jej podstawowe właściwości zostają zasadniczo zmodyfikowane. Wykorzystując symulacje numeryczne, możemy przewidzieć, w jaki sposób promieniowanie UV wpłynie na daną chmurę pyłu w zależności od jej masy (gravitacji), gęstości, siły promieniowania UV, a nawet wpływu pola magnetycznego gwiazdy. Zależności te sprawiają, że obliczenia są niezwykle skomplikowane. Dlatego w tym artykule wezmę pod uwagę tylko wzajemne relacje pomiędzy dwiema wielkościami: ciśnieniem jonizacji P_{jon} , które zależy od typu i odległości od gwiazdy, oraz ciśnieniem panującym w chmurze pyłu (P_{chmura}).

Ciśnienie jonizacji to ciśnienie, jakie wywiera strumień energetycznych cząstek, pochodzących np. od młodej gwiazdy, na neutralny gaz. Duże ciśnienie powoduje silniejszą jonizację neutralnego gazu.

Przeanalizujemy trzy przypadki:

- $P_{\text{jon}} \ll P_{\text{chmura}}$: bardzo wysoka gęstość pyłu powoduje silną rekombinację, która odgrywa rolę tarczy ochronnej przeciwko silnemu promieniowaniu UV. Struktura chmury nie zostaje zmieniona.
- $P_{\text{jon}} \gg P_{\text{chmura}}$: gęstość chmury pyłowej jest bardzo mała; z tego powodu promieniowanie ultrafioletowe młodej gwiazdy bez przeszkód przechodzi przez chmurę pyłu, jonizując ją. Zjawisko to nazywamy jonizacją błyskawiczną (*flash ionisation*).
- $P_{\text{jon}} \gtrsim P_{\text{chmura}}$: chmura pyłu jest wystarczająco gęsta, aby stawić częściowy opór promieniowaniu UV emitowanemu przez gwiazdę – tylko zewnętrzna warstwa pyłu zostaje zjonizowana. Powstaje tzw. zjonizowana warstwa graniczna (fala uderzeniowa). Temperatura powierzchni chmury pyłowej wzrasta do 10^4 K, co umożliwia rozchodzenie się izotermicznej fali uderzeniowej w chmurze.

Rekombinacja jest procesem, w którym dodatnie jony plazmy wychwytyją wolne (energetyczne) elektrony, tworząc neutralny gaz.

Oczywiście trzeci przypadek jest najbardziej interesujący, gdyż znacząco modyfikuje właściwości pyłu. W momencie uderzenia czoła fali promieniowania UV

*Adiunkt, Narodowe Centrum Badań Jądrowych

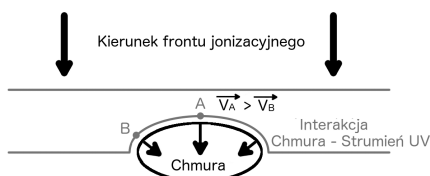
warstwa zewnętrzna chmury pyłowej zostaje wepchnięta do środka. Dzieje się tak przez różnicę prędkości fali uderzeniowej w różnych miejscach chmury pyłu. Na rysunku 1 zaznaczono dwa punkty A i B oraz kierunek frontu uderzeniowego. Punkt A odpowiada środkowi powierzchni chmury (tutaj następuje pierwsze zetknięcie z frontem uderzeniowym), natomiast punkt B jest najbardziej skrajnym punktem chmury gazu (tutaj kontakt chmury z falą uderzeniową następuje najpóźniej). Prędkość frontu uderzeniowego na powierzchni pyłu zależy od kąta pomiędzy punktami A i B i zmniejsza się wraz z odległością od punktu centralnego A. Oznacza to, że środek powierzchni chmury zapada się szybciej niż jej punkty krańcowe. W ten sposób tworzy się obszar o wysokiej gęstości, który staje się coraz gęstszy wraz z przesuwaniem się frontu uderzeniowego. Po pewnym czasie (zazwyczaj po około 1 000 000 lat) gęstość chmury osiąga wartość krytyczną n w zakresie $10^8 - 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, i w chmurze powstaje nowe pokolenie gwiazd.

Znając wielkość strumienia w fali UV oraz zakładając, że chmura pyłowa znajduje się w stanie równowagi hydrostatycznej, można wyznaczyć masę krytyczną (M_k), powyżej której chmura się zapadnie:

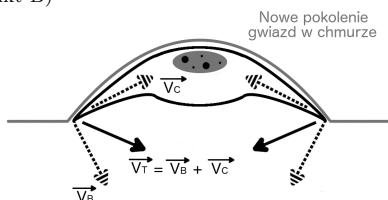
$$(1) \quad M_k = 1,29 \cdot \sqrt[3]{\frac{\alpha_B c_s^{14}}{16\pi^2 m_H^2 c_i^4 G^5 \cdot F}} \propto \sqrt[3]{\frac{c_s^{14}}{F}},$$

gdzie α_B to współczynnik rekombinacji wodoru dla wszystkich poziomów za wyjątkiem stanu podstawowego, c_s to prędkość dźwięku w chmurze, proporcjonalna do temperatury panującej w ośrodku ($c_s \propto \sqrt{T}$), m_H to masa atomu wodoru, G to stała grawitacji, a F to strumień emisji fotonów w zakresie UV (o energiach większych niż 13,6 eV). Najistotniejszymi parametrami równania 1 są prędkość rozchodzenia się dźwięku w chmurze (c_s) i strumień energii pochodzący z gwiazdy (F). Jeżeli wartość parametru c_s jest wysoka, oznacza to, że ciśnienie panujące w chmurze jest wysokie. W związku z tym liczba rekombinacji, a co za tym idzie M_k , wzrasta, utrudniając zapadnięcie się chmury. Jeżeli strumień F jest wysoki, to mamy do czynienia z odwrotną sytuacją – chmura bardzo łatwo zapadnie się pod wpływem frontu uderzeniowego (wartość M_k będzie mała).

Wzbudzenie procesu tworzenia się gwiazd za pomocą frontu uderzeniowego UV nazywane jest wymuszoną implozją (*radiation-driven implosion*, RDI). Jest to zjawisko potwierdzone przez obserwacje w zakresie światła widzialnego i podczerwonego. Fala uderzeniowa przemieszczająca się od powierzchni chmury pyłowej ku jej środkowi pozostawia po sobie ślad w postaci nowych gwiazd. Przy czym najstarsze gwiazdy obserwuje się przy powierzchni chmury, a najmłodsze w jej środku – wzdłuż propagacji fali. Mechanizm RDI wzbudza również procesy tworzenia się masywnych gwiazd (o masie powyżej $8 M_\odot$), dokładny opis znaleźć można w artykule



Rys. 1. Schemat obrazujący powstanie fali uderzeniowej w chmurze pyłu. Strzałkami zaznaczone są prędkości poruszania się obszarów chmury prostopadłych do frontu (punkt A) oraz punktów krańcowych chmury (punkt B)



Rys. 2. Zmiana kształtu chmury pyłowej pod wpływem uderzenia fali promieniowania UV. Krańce chmury zaczynają się ugiąć z powodu powstania zagęszczonego obszaru w centrum chmury, gdzie zaczynają tworzyć się nowe gwiazdy

Gwiazdne przedszkola w Δ_{20}^4). Takie masywne gwiazdy emitują silne strumienie promieniowania UV i na nowo modyfikują otaczający je ośrodek międzygwiazdowy, powodując powstawanie kolejnych pokoleń gwiazd.

Strumień promieniowania UV nie tylko rozpoczyna

procesy gwiazdotwórcze w chmurze pyłu, ale też modyfikuje jej morfologię. W początkowych etapach uderzenia fali skrajne obszary chmury popychane są prostopadle do powierzchni chmury. Powstaje w ten sposób gęsty obszar pyłu, który zmienia kierunek prędkości rozchodzenia się fali uderzeniowej na końcach chmury. Kształt chmury zaczyna się zmieniać. Jej krańce zginają się do zewnątrz, tworząc struktury przypominające skrzydła. Tak zmodyfikowane chmury pyłu nazywamy świetlistymi aureolami (*Bright Rimmed Cloud*, BRC) i klasyfikujemy je na podstawie kąta inklinacji skrzydeł. Na rysunku 2 przedstawiony jest typ A o lekkim zakrzywieniu krańców „skrzydeł”. Typ C to struktura, w której skrzydła się łączą. Natomiast fazy pośrednie klasyfikowane są jako typ B. Interesujące w tym procesie jest to, że struktura chmury nie musi ewoluować od typu A do typu C. Zmiana kształtu może zatrzymać się na typie A lub B. Ale to nie wszystko. Po uderzeniu fali mogą powstać jeszcze bardziej skomplikowane struktury – wszystko zależy od początkowego kształtu chmury pyłowej. Najbardziej efektywne przybierają kształt litery M (typ M, BRC).

Tłumaczenie: Katarzyna Małek, Anna Durkalec

O tym, jak Martynałow uratował królestwo

* Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski

Zofia MIŚKIEWICZ, Michał MIŚKIEWICZ**

Dawno, dawno temu w odległym królestwie grasował straszliwy smok, którego zdołał pokonać dopiero dzielny Zygryd. W nagrodę otrzymał on połowę królestwa oraz rękę królowej Brunhildy. Nie będziemy tu jednak mówić o heroicznej walce naszego bohatera, ale o jej ekonomicznych następstwach. Otóż zgodnie z kontraktem swoją nagrodę Zygryd mógł otrzymać dopiero po roku – ten mały szczegół okazał się nieco kłopotliwy.

Zygryd darzył Brunhildę szczerym uczuciem, od razu oboje zaczęli planować ślub, a połowę królestwa postanowili spieniężyć. Druga połowa królestwa była już notowana na giełdzie, wiadomo było zatem, że jest w tym momencie warta 100 talentów (w skrócie: tal.). Zygryd potrzebował pieniędzy, jednak nie miał jeszcze prawa do swoich udziałów. Miał za to żylkę hazardzisty, postanowił więc już teraz sprzedać prawo do kupna swojej połowy królestwa rok później, za to w obniżonej cenie – 80 tal. Uznał za sprawiedliwe zażądać za taki przywilej 20 tal. (płatnych od zaraz). W szczególności kontrakt jest więc następujący: umówiony Kupiec płaci dzisiaj Zygrydowi 20 tal., a za rok od teraz

- (A) jeśli cena giełdowa jest powyżej 80 tal., kupuje połowę królestwa od Zygryda za 80 tal.;
- (B) jeśli cena spadła poniżej 80 tal., Kupiec odstępuje od transakcji, gdyż bardziej opłacałoby mu się zakup na giełdzie.

Jak to bywa w takich przypadkach, szybko znaleźli się przerożni doradcy. Królestwo toczyło wówczas wojnę z sąsiednim państwem. Mag optymista przekonywał, że wojna ta z pewnością będzie wygrana, przez co wartość królestwa się podwoi. Za rok cena połowy wyniesie więc 200 tal., a Kupiec za przywilej kupna po niższej cenie powinien zapłacić 120 tal. Tymczasem mag Pesymista był przeciwnego zdania – wojna skończy się przegraną, a wartość królestwa zmniejszy się dwukrotnie. W takim scenariuszu cena połowy królestwa wyniesie 50 tal., co czyni przywilej kupna bezwartościowym – Kupiec powinien więc zapłacić okrągłe 0 tal.

Wszyscy byli zgodni, że któryś z magów ma rację – cena giełdowa za rok wyniesie 50 lub 200 tal. – nie wiadomo było tylko, który. Z pośrednią propozycją przyszedł mag Realista: skoro są dwie możliwości, to zgodnie

Kontrakt opisany obok nazywa się fachowo *europijską opcją kupna*.