



Rozumowanie to pozostaje prawdziwe dla dowolnej parzystej liczby różnych punktów płaszczyzny  $S_1, S_2, \dots, S_{2k}$  ( $k \geq 2$ ) będących środkami kolejnych boków wielokąta. Odkryliśmy w ten sposób następujące twierdzenie:

**Twierdzenie** (Edward Kasner, 1903). *Niech  $S_1, S_2, \dots, S_i$  ( $i \geq 3$ ) będą różnymi punktami płaszczyzny, które są środkami kolejnych boków wielokąta.*

(a) *Jeżeli  $i$  jest liczbą nieparzystą ( $i = 2k + 1, k \geq 1$ ), to istnieje dokładnie jeden wielokąt  $W_1W_2 \dots W_i$  taki, że*

$$(*) \quad S_j = \frac{1}{2}(W_j + W_{j+1}), \quad j = 1, 2, \dots, i, \quad \text{gdzie } W_{i+1} = W_1.$$

(b) *Jeżeli  $i$  jest liczbą parzystą ( $i = 2k, k \geq 2$ ), to wielokąt  $W_1W_2 \dots W_i$  spełniający warunek (\*) istnieje wtedy i tylko wtedy, gdy  $S_1 + S_3 + \dots + S_{2k-1} = S_2 + S_4 + \dots + S_{2k}$ .*

Punkt (b) geometrycznie oznacza, że zbiory punktów  $S_j$  o indeksach nieparzystych oraz parzystych mają ten sam środek ciężkości. Wówczas takich wielokątów jest nieskończenie wiele i dowolny punkt płaszczyzny różny od punktów  $S_j$  może pełnić rolę wierzchołka  $W_1$ .

Powyższe uwagi nie wyczerpują zagadnienia. Rozważania można prowadzić, rozpatrując dla  $i \geq 4$  „wieloboki przestrzenne”.

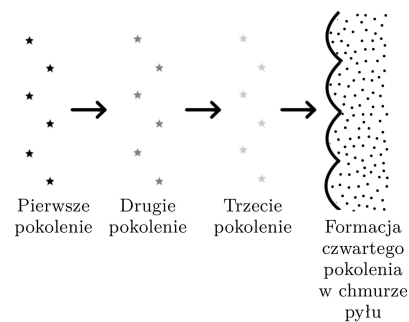
Opisana sytuacja to prosta ilustracja działania skończonych szeregów Fouriera, ogólniej – analizy harmonicznej, która z małego zbioru informacji stara się odtworzyć ogólniejsze zjawisko. Czasem można to zrobić bardzo precyzyjnie, innym razem tylko w ogólnym zarysie, a czasem jest to niemożliwe.

## Collect and Collapse: obszary zjonizowane a formowanie się gwiazd

Miguel FIGUEIRA\*

\* Adiunkt, Narodowe Centrum Badań Jądrowych

Gwiazdy typu OB to gorące, masywne gwiazdy widmowe typu O (hiperolbrzymy o temperaturze powierzchni 25 000–50 000 K i masach  $>16 M_\odot$ ) lub wczesnego typu B (jasne, masywne, 2,1–16  $M_\odot$ , olbrzymy o temperaturze 10 000–30 000 K), które tworzą się w luźno zorganizowanych grupach zwanych stowarzyszeniami OB. Oba typy gwiazdowe są bardzo masywne i krótko żyjące, dlatego nie oddalają się zbyt od miejsca swojego powstania.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie sekwencyjnego scenariusza tworzenia się gwiazd z uformowanymi trzema pokoleniami i czwartym pokoleniem gwiazd tworzącym się w chmurze pyłu. Strzałki wskazują, że do powstania drugiego i wyższych pokoleń gwiazd przyczyniła się bezpośrednio podgrupa wcześniejsza

Gwiazdy o masach większych niż  $8 M_\odot$  nazywane są gwiazdami o dużej masie.

W połowie XX wieku astronomowie zaobserwowali kilka niezwiązanych ze sobą grawitacyjnie skupisk gwiazd wysokomasowych typu OB (tzw. asocjacji gwiazdowych OB). Okazało się, że każda z tych grup zawiera gwiazdy mniej więcej w tym samym wieku, co może sugerować, że formowanie się gwiazd w tych obszarach następowało w sposób sekwencyjny: pierwsza generacja spowodowała uformowanie drugiego pokolenia gwiazd o dużych masach, druga – trzeciego i tak dalej (rys. 1). Ten prosty, sekwencyjny scenariusz może wyjaśnić, w jaki sposób gwiazdy w każdej z zaobserwowanych podgrup znajdują się w tej samej lub bardzo zbliżonej fazie ewolucji.

Terminem H II astronomowie określają zjonizowany wodór atomowy (obszar H I to obłok neutralnego wodoru atomowego, a  $H_2$  to wodór cząsteczkowy). W artykule „Gwiazdne przedszkola – obszary H II w galaktyce” ( $\Delta_{20}^4$ ), opisałem tworzenie się zjonizowanych (H II) regionów wokół gwiazd o dużych masach. Zasadniczo gwiazdy o dużej masie emitują fotony w zakresie ultrafioletowych (UV) długości fal elektromagnetycznych, które jonizują chmurę wodoru wokół nich. Kiedy liczba jonizacji jest równa liczbie rekombinacji, obszar H II osiąga swoją początkową wielkość nazywaną sferą Strömngrena. Po utworzeniu sfery Strömngrena ciśnienie jonizacji wewnątrz obszaru H II jest większe niż ciśnienie otaczającej go chmury. Ta różnica ciśnień powoduje rozpoczęcie fazy ekspansji. Naddźwiękowy front jonizacyjny (IF) tworzy front uderzeniowy (SF), który następnie ścieśnia chmurę ( $\Delta_{20}^4$ ). Poprzez rozszerzanie się coraz więcej materiału gromadzi się pomiędzy frontami. Stabilne ciśnienie utrzymywane pomiędzy frontami IF a SF sprawia, że chmura (w kształcie torusa) jest odporna na zapadanie grawitacyjne, aż do momentu osiągnięcia gęstości krytycznej, powyżej której utrzymywany pomiędzy frontami materiał rozpada się na kawałki. Powstałe w ten sposób fragmenty będą stanowiły siedlisko dla kolejnych pokoleń gwiazd. Mechanizm ten, w którym nowe pokolenie gwiazd jest konsekwencją gromadzenia się (*collect*)



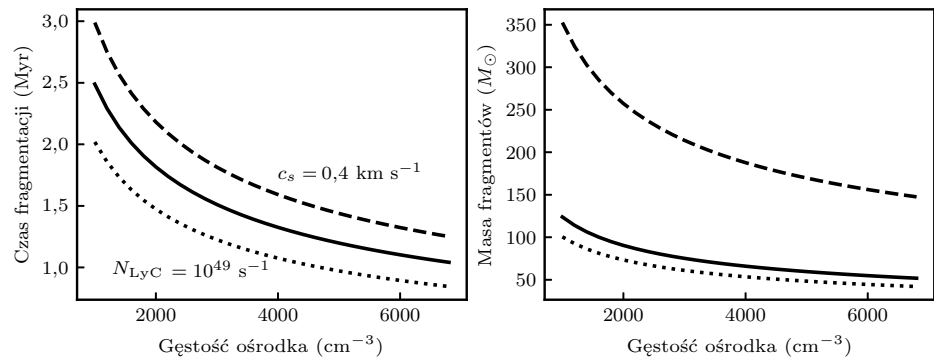
$H_{\alpha}$  to linia w widmie atomu wodoru o długości fali rzędu 656,28 nm.

materiału i zapadania się (*collapse*) otrzymanej chmury materiału, znany jest jako **Collect&Collapse** (C&C) i został odkryty przez Bruce'a Elmegreena i Charlesa Ladę w 1977 roku. Zauważyli oni, że warstwa ogrzana przez region H II sprzyja powstawaniu gwiazd o dużej masie, ponieważ masa otrzymanych fragmentów jest proporcjonalna do temperatury materiału w warstwie pomiędzy frontami. Ponadto niestabilność w obszarze H II, spowodowana wstrząsem z rozpadu warstwy po osiągnięciu temperatury krytycznej, prowadzi do powstawania większych, a co za tym idzie, masywniejszych fragmentów. Innymi słowy, gwiazdy wysokomasowe mogą wzbudzać powstawanie gwiazd wysokomasowych, które następnie same mogą indukować powstawanie nowych gwiazd wysokomasowych. Taka reakcja łańcuchowa może zachodzić do momentu wyczerpania zapasu gazu w chmurze.

W celu oszacowania właściwości fizycznych związanych z fragmentami warstw astronomowie posiłkują się sformułowaniami analitycznymi. Poniżej przyjrzymy się dwóm z nich – czasowi potrzebnemu do rozdrobnienia (fragmentacji) warstwy oraz średniej masie powstałych kawałków:

$$t_{\text{frag}} \sim 1,56 \text{ Myr} \cdot c_s^{\frac{7}{11}} \cdot N_{\text{LyC}}^{-\frac{1}{11}} \cdot n_0^{-\frac{5}{11}}, \quad M_{\text{frag}} \sim 23 M_{\odot} \cdot c_s^{\frac{40}{11}} \cdot N_{\text{LyC}}^{-\frac{1}{11}} \cdot n_0^{-\frac{5}{11}},$$

gdzie  $c_s$ ,  $N_{\text{LyC}}$  oraz  $n_0$  oznaczają kolejno prędkość dźwięku, liczbę fotonów o energiach powyżej granicy Lymana emitowanych z masywnej gwiazdy oraz początkową gęstość chmury, a Myr oznacza miliony lat. W pierwszym przybliżeniu przyjmujemy, że  $c_s \sim T^{\frac{1}{2}}$ , gdzie  $T$  jest temperaturą chmury. Liczbę fotonów  $N_{\text{LyC}}$  możemy wyznaczyć z pomiaru linii  $H_{\alpha}$  (cecha charakterystyczna zjonizowanego wodoru), **emisji swobodno-swobodnej** (*free-free emission*, promieniowanie pochodzące z rozpraszania swobodnych elektronów na jonach, obserwowane w radiowych długościach fal) lub z symulacji, o ile znany jest typ spektralny gwiazdy o wysokiej masie. Wartość  $n_0$  jest trudna do oszacowania, ponieważ początkowy rozkład pyłu w chmurze nie jest znany. Generalnie zakładamy, że materiał neutralny zawarty w warstwie początkowo znajdował się wewnątrz obszaru H II.



Rys. 2. Czas potrzebny do rozdrobnienia warstwy,  $t_{\text{frag}}$  (lewy panel) oraz średnia masa fragmentów  $M_{\text{frag}}$  (prawy panel) w funkcji początkowej gęstości chmury  $n_0$ . Ciągłe linie odpowiadają modelowi z typowymi wartościami  $c_s$  oraz  $N_{\text{LyC}}$ , linia przerywana otrzymana jest dla  $c_s = 0,4 \text{ km s}^{-1}$ , a kropkowana dla  $N_{\text{LyC}} = 10^{49} \text{ s}^{-1}$ .

Na rysunku 2 ciągłą linią przedstawiona jest zależność czasu potrzebnego do rozdrobnienia warstwy,  $t_{\text{frag}}$ , w funkcji parametru  $n_0$  dla wartości  $c_s = 0,3 \text{ km s}^{-1}$  ( $T \sim 20 \text{ K}$ ) oraz  $N_{\text{LyC}} = 10^{48} \text{ s}^{-1}$ . Wraz ze wzrostem parametru  $n_0$  krytyczna gęstość, powyżej której warstwa rozpada się, osiągnana jest szybciej, a więc  $t_{\text{frag}}$  jest niższy. Również wzrost  $N_{\text{LyC}}$  ( $10^{49} \text{ s}^{-1}$ , linia kropkowana) prowadzi do skrócenia czasu  $t_{\text{frag}}$ . Jeśli  $T$  wzrośnie o współczynnik 2 ( $c_s \sim 0,4 \text{ km s}^{-1}$ , przerywana linia),  $t_{\text{frag}}$  także wzrośnie, gdyż temperatura będzie przeciwdziałać zapaści grawitacyjnej. Na rysunku można zaobserwować, że masa fragmentów zależy głównie od czynnika  $c_s$ , czyli pośrednio od temperatury chmury, ale także od niestabilności w warstwie, a nie od  $N_{\text{LyC}}$  czy  $n_0$ .

Występowanie masywnych fragmentów nie jest gwarancją, że gwiazdy o dużej masie będą się w nich skutecznie formować, ale zdecydowanie wspiera tezę, że gwiazdy o masach powyżej  $8 M_{\odot}$  mają, poprzez mechanizm C&C, potencjał do tworzenia nowego pokolenia gwiazd o dużych masach.

Źródło: Katarzyna MAŁEK  
i Anna DURKALEC