



## Nastanak protozvijezda i Jeansova masa

Krešimir Pavlovski,<sup>1</sup> Zagreb

Pogled na zvjezdano nebo može nas zavarati. Naizgled se ništa ne događa – zvijezde, točkasti treperavi izvori svjetla nepromjenjivo zrače iz noći u noć, i tako iz godine u godinu. Međutim, sve se zvijezde vremenom mijenjaju, ali promjene se događaju postepeno a vremenske skale daleko nadmašuju vremensku skalu na koju je čovjek navikao. U nekom je smislu razvoj zvijezda ciklički proces. Zvijezde nastaju iz plina i prašine koji postoji u prostoru između zvijezda, i naziva se međuzvjezdana sredina (MZS). Tijekom razvoja zvijezde, ovisno o njezinoj masi, dio tvari bit će vraćen u MZS, bilo zvjezdanim vjetrovima, bilo eksplozivnim pojavama. Sljedeće generacije zvijezda će nastati iz te “prerađene” tvari. Da bismo razumjeli razvoj zvijezda, moramo također proučavati prirodu MZS.



*Slika 1. Emisijska maglica M16 (NGC 6611). Maglica je primjer galaktičkog HII područja, što znači da se radi o području ioniziranog vodika (otuda karakteristična crvena boja takvih maglica). Maglica svijetli zahvaljujući energiji koju dobiva od ultraljubičastih fotona vrućih masivnih zvijezda koje su nastale od njezine tvari prije dva milijuna godina. Na slici se vidi manji skup takvih vrućih O i B zvijezda u gornjem desnom dijelu maglice. Velik broj ‘crvenih’ zvijezda samo je naizgled takve boje, ustvari one su ‘pocrvenjele’ zbog apsorpcije njihovog zračenja na česticama prašine u maglici koja ih okružuje. U središnjem dijelu maglice vidi se nekoliko traka koje su zbog svojeg izgleda dobile naziv ‘slonovske surle’. (Snimak s 4-m Mayallovog teleskopa Kitt Peak National Observatory.)*

<sup>1</sup> Autor je redoviti profesor astronomije i astrofizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: kresimir@phy.hr, <http://www.phy.hr/~kresimir>

Veliki molekularni oblaci enormne su nakupine plina i prašine gdje su tipične temperature  $T \sim 20$  K, gustoća čestica u području  $n \sim 100 - 300 \text{ cm}^{-3}$ , mase oblaka mogu dosegnuti  $10^6 M_{\odot}$ , a tipične su dimenzije reda 50 pc ( $1 M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ,  $1 \text{ pc} = 3.086 \cdot 10^{16} \text{ m}$ ). Molekularni oblaci nisu jednolike gustoće već se opažaju mnogo gušće jezgre s karakterističnim dimenzijama  $r \sim 0.05 - 1 \text{ pc}$ ,  $T \sim 100 - 200 \text{ K}$ ,  $n \sim 10^{13} - 10^{15} \text{ m}^{-3}$  i  $M \sim 10 - 1000 M_{\odot}$ . U našoj je galaksiji poznato na tisuće velikih molekularnih oblaka, a nađeni su uglavnom u spiralnim krakovima. Do danas je, većinom radio-astronomskim metodama, u MZS otkriveno više od 50 različitih molekula, od vrlo jednostavnih dvoatomskih kao  $\text{H}_2$  i  $\text{CO}$  do prilično dugačkih organskih lanaca, kao što je  $\text{HC}_{11}\text{N}$ .

Britanski astrofizičar Sir James Jeans (1877.–1946.) jedan je od prvih koji je istraživao problem nastanka zvijezda urušenjem međuzvjezdanog oblaka. Godine 1902. odredio je temeljne uvjete razmatrajući efekte malih odstupanja od hidrostatske ravnoteže. Virijalni teorem (vidi MFL 3/203, str. 152):

$$2K + U = 0, \quad (1)$$

opisuje uvjet za ravnotežno stanje stabilnog, gravitacijski vezanog sustava. Dakle, ako dvostruka ukupna unutarnja kinetička energija molekularnog oblaka ( $2K$ ) premašuje apsolutnu vrijednost gravitacijske potencijalne energije ( $|U|$ ), sila uslijed tlaka plina prevladat će nad gravitacijskom privlačnom silom i oblak će se širiti. Naprotiv, ako je unutarnja kinetička energija premala, oblak će se urušiti. Granica između ta dva slučaja odredit će kritični uvjet stabilnosti međuzvjezdanog oblaka.

Bez izvođenja, napisat ćemo gravitacijsku potencijalnu energiju sferičnog oblaka konstantne gustoće:

$$U \sim -\frac{3}{5} \frac{GM_{ob}^2}{R_{ob}}, \quad (2)$$

gdje su  $M_{ob}$  i  $R_{ob}$  masa i polumjer međuzvjezdanog oblaka, a  $G$  je gravitacijska konstanta ( $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N m kg}^{-2}$ ). Također, možemo procijeniti unutrašnju kinetičku energiju oblaka:

$$K = \frac{3}{2} NkT, \quad (3)$$

gdje je  $N$  ukupni broj čestica u oblaku a  $k$  je Boltzmannova konstanta ( $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ). Međutim, za  $N$  vrijedi:

$$N = \frac{M_{ob}}{\mu m_H}, \quad (4)$$

gdje je  $\mu$  srednja molekularna težina, a  $m_H$  je masa vodikovog atoma ( $m_H = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ). Sada, korištenjem virijalnog teorema, tj. (1), možemo napisati uvjet za gravitacijsko urušenje oblaka ( $2K < |U|$ ):

$$\frac{3M_{ob}kT}{\mu m_H} < \frac{3}{5} \frac{GM_{ob}^2}{R_{ob}}. \quad (5)$$

Obično se umjesto polumjera u izrazu (5) koristi početna gustoća oblaka  $\rho_0$ :

$$R_{ob} = \left( \frac{3M_{ob}}{4\pi\rho_0} \right)^{1/3}. \quad (6)$$

Uvrštenjem (6) u (5) možemo odrediti najmanju masu oblaka za koju će još uvijek doći do spontanog urušenja oblaka a time i do stvaranja protozvijezde. Taj je uvjet

poznat kao **Jeansov kriterij**:

$$M_{ob} > M_J,$$

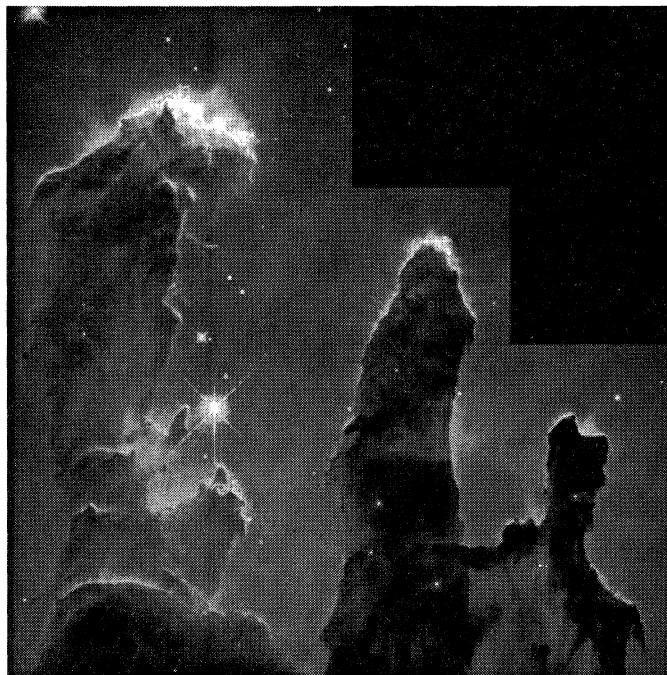
gdje je

$$M_J \simeq \left( \frac{5kT}{G\mu m_H} \right)^{3/2} \left( \frac{3}{4\pi\rho_0} \right)^{1/2}. \quad (7)$$

Kritična vrijednost  $M_J$  naziva se **Jeansova masa**.

Za tipični difuzni vodikov oblak  $T = 50 \text{ K}$  i  $n = 1000 \text{ cm}^{-3}$ . Uz pretpostavku da je oblak u potpunosti građen od vodikovih atoma nalazimo da je inicijalna gustoća  $\rho_0 = m_H n = 1.7 \cdot 10^{-18} \text{ kg m}^{-3}$ . Uz  $\mu = 1$  i koristeći (7), najmanji iznos mase za koji će još uvijek doći do urušenja je približno  $M_J \sim 1000 M_\odot$ . Međutim, Jeansova masa  $M_J$  daleko premašuje masu tipičnog vodikovog oblaka koja se kreće u rasponu od 1 – 100  $M_\odot$ . Difuzni su vodikovi oblaci stabilni i ne dovode do nastanka protozvijezda.

Gusti dijelovi velikih molekularnih oblaka imaju  $T = 150 \text{ K}$  i  $n = 10^8 \text{ cm}^{-3}$ . Izračunaj Jeansovu masu  $M_J$  i usporedi je s masom koja je opažanjima određena u rasponu od 10 – 1000  $M_\odot$  za takve objekte. Odolijevaju li jezgre velikih molekularnih oblaka gravitacijskom urušavanju? Preuredi izraz za Jeansovu masu  $M_J$ , tj. (7) tako da odrediš najmanji polumjer za koji će još doći do urušenja oblaka gustoće  $\rho_0$ . Ta se veličina naziva Jeansova duljina  $R_J$ . (Rješenja:  $M_J = 17 M_\odot$ ;  $R_J \simeq \sqrt{\frac{15kT}{4\pi G\mu m_H \rho_0}}$ .)



*Slika 2. Gusti stupci plina i prašine ("slonovske surle") iz maglice M16 snimljeni pomoću HST (Hubble Space Telescope — Hubbleov svemirski teleskop). Upravo na ovakvim zgušnjnjima u velikim molekularnim oblacima nastaju protozvijezde. I ovdje će, ako to dozvoli siloviti tlak ultraljubičastih fotona sa sjajnih O i B zvijezda u obližnjem mladom zvjezdanom skupu, nastati nova generacija zvijezda.*