

ABSTRAK

EVOLUSI DINAMIK DAN SEJARAH PEMBENTUKAN GUGUS GANDA DI BIMASAKTI DAN AWAN MAGELLAN BESAR

Oleh

Rhorom Priyatikanto

NIM: 30314002

(Program Studi Doktor Astronomi)

Gugus bintang terbentuk dari awan molekul yang mengalami kontraksi akibat gangguan eksternal seperti gelombang kerapatan lengan spiral, pasang surut galaksi dekat, atau papasan dengan objek lain. Di antara sekian banyak gugus bintang yang ditemukan di galaksi, terdapat beberapa yang berada dekat dengan gugus lainnya. Pasangan yang berdekatan semacam ini dianggap sebagai kandidat gugus ganda yang berkemungkinan memiliki sejarah pembentukan dan evolusi yang sama. Pembentukan gugus ganda sendiri dapat terjadi melalui beberapa mekanisme seperti fragmentasi instan awan molekul, fusi awan molekul yang diinduksi oleh tumbukan, pembentukan bertahap, serta proses penangkapan gugus bintang yang sedang melintas dekat. Setelah terbentuk, gugus ganda akan mengalami evolusi dinamik yang tidak sama seperti evolusi gugus individual. Banyak hal yang telah dipelajari terkait pembentukan dan evolusi gugus ganda galaktik dan ekstragalaktik. Namun, tidak sedikit juga yang belum dipahami dengan baik. Studi ini bertujuan untuk: (1) melakukan identifikasi gugus ganda galaktik dan ekstragalaktik sebagai bahan analisis statistik guna memahami karakteristik populasi gugus ganda; (2) mengetahui peran interaksi antargalaksi dalam pembentukan gugus ganda; (3) mempelajari evolusi dinamik yang dialami gugus ganda; dan (4) mengetahui parameter kestabilan dan kala hidup gugus ganda dalam pengaruh proses dinamika internal dan eksternal.

Terdapat dua metode yang digunakan untuk menjawab tujuan studi tersebut. Pendekatan pertama adalah analisis statistik terhadap populasi gugus ganda di Galaksi Bimasakti dan Awan Magellan Besar (*Large Magellanic Cloud*, LMC). Data yang digunakan bersumber dari beberapa katalog yang telah dipublikasikan, dilengkapi dengan hasil analisis yang dilakukan secara mandiri. Produk analisis statistik yang telah dilakukan adalah distribusi empirik gugus ganda galaktik dan ekstragalaktik. Dari distribusi tersebut, dapat dideduksi bahwa gugus ganda cenderung berusia muda ($\lesssim 100$ Myr) dan letaknya bersesuaian dengan lokasi kompleks pembentukan bintang. Terdapat indikasi bahwa fraksi gugus ganda mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan laju pembentukan bintang beberapa juta tahun terakhir. Di LMC, peningkatan fraksi gugus ganda pada $t \approx -100$ Myr dapat dikaitkan dengan episode terakhir papasan dekat dengan *Small Magellanic Cloud* pada $t \approx -150$ Myr. Bukti ini mendukung teori pembentukan gugus ganda melalui fusi awan molekul, di mana tumbukan antargalaksi meningkatkan dispersi kecepatan

awan molekul di galaksi dan meningkatkan probabilitas papasan antarawan yang melahirkan gugus ganda.

Pendekatan kedua adalah simulasi evolusi dinamik yang dialami gugus ganda primordial menggunakan model semi-analitis dan model N -benda. Dalam model semi-analitis, gugus ganda dianggap sebagai dua buah massa yang mengitari satu sama lain sembari mengalami kehilangan massa dan pasang surut eksternal. Evolusi model ini cukup menyerupai model N -benda yang lebih realistis. Terdapat beberapa poin penting yang disimpulkan dari simulasi tersebut. Pertama, orientasi orbit gugus ganda (relatif terhadap bidang galaksi) menentukan evolusi orbit yang akan dialami sistem tersebut serta kala hidup yang dimilikinya. Dalam evolusinya yang berlangsung selama ~ 100 Myr, sistem gugus ganda dapat mengalami pembalikan orbit (*orbital reversal*), peluruhan orbit (*spiral-in*), atau osilasi di sekitar bidang galaksi. Kedua, pasang surut galaksi memberikan dampak yang berbeda terhadap sistem ganda dengan orbit prograde dan retrograde. Ketiga, penggabungan gugus ganda disertai pelepasan massa yang cukup signifikan ($\sim 10\%$ dari massa awal sistem) dalam waktu singkat (*outburst*). Penggabungan juga menghasilkan gugus berotasi yang memiliki laju evaporasi lebih dari normal.

Kata kunci: gugus bintang, Galaktik, ekstragalaktik, dinamika sistem bintang

ABSTRACT

DYNAMICAL EVOLUTION AND FORMATION HISTORY OF BINARY STAR CLUSTERS IN THE MILKY WAY AND LARGE MAGELLANIC CLOUD

By

Rhorom Priyatikanto

NIM: 30314002

(Doctoral Program in Astronomy)

Star clusters are formed from molecular clouds that experience contraction induced by external perturbations such as density wave from the spiral arms, tidal force from close neighboring galaxies, or collision with other bodies. Among a large number of star clusters found in galaxies, there are several pairs of double clusters. Such close pairs are considered as the candidate of binary clusters with a possibility of common formation and evolution histories. The formation of binary clusters is possible through several alternative mechanisms such as instantaneous fragmentation of a molecular cloud, cloud fission induced by collisions, sequential formation, and the capture of a closely passing cluster. After genuinely formed, binary star clusters experience dynamical evolution unlike the evolution of individual clusters. Many things have been studied in relation with the formation and evolution of galactic and extragalactic binary star clusters. However, many things not yet explored and understood. This study aims to: (1) identify the candidates of galactic and extragalactic binary clusters as the input data for the statistical analysis to understand the characteristics of the populations; (2) understand the role of the interaction between galaxies in the formation of binary star clusters; (3) study the dynamical evolution of binary star clusters; and (4) understand the parameters affecting the stability and lifetime of binary star clusters.

There are two methods used to accomplish the objectives of this study. Firstly, the statistical analysis of binary star cluster population in Milky Way and Large Magellanic Cloud (LMC) was conducted. The data used in this analysis come from several published catalogs, complemented by original data produced in this study. The products of the statistical analysis are the empirical distribution of galactic and extragalactic binary star clusters. From the established distributions, it can be deduced that the binary clusters tend to be young ($\lesssim 100$ Myr) while their locations coincide with the locations of star forming complexes. There is an indication that the binary fraction increases with the rise of star formation rate in the last millions years. In the LMC, the increase of binary fraction at $t \approx -100$ Myr can be associated to the last episode of close encounter with the Small Magellanic Cloud at $t \approx -150$ Myr. This observational evidence supports the theory of binary cluster formation through fission of molecular clouds where the encounter between galax-

ies enhanced the clouds velocity dispersion, which in turn increased the probability of cloud-cloud collisions that produce binary clusters.

The second method was the simulation of the binary clusters' dynamical evolution using semi-analytical and N-body model. In the semi-analytical model, binary clusters can be considered as two point masses orbiting each other while experiencing mass loss and external tides. The evolution of semi-analytical model is compatible with more realistic N-body models. From the simulation, several important points are concluded. Firstly, the orientation of binary orbit (with respect to galactic plane) determines the orbital evolution experienced and also the lifetime of the system. During the dynamical evolution that lasts ~ 100 Myr, the binary clusters may experience orbital reversal, orbital decay (spiral-in), or vertical oscillation about the galactic plane. Secondly, the galactic tidal field acts differently to the system with prograde and retrograde orbit. Third, the merger of binary star clusters includes a significant portion of mass release ($\sim 10\%$ of the system initial mass) in a short duration (outburst). The mergers also produce rotating clusters with typical evaporation above normal rate.

Keywords: star cluster, Galactic, extragalactic, dynamics of stellar system