

YILDIZ EVRİMİ ÜSTÜNE DÖNMENİN ETKİLERİ

Necati Özkara, Dilhan Eryurt—Ezer

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fizik Bölümü, ANKARA

ÖZET : Normal yıldız evrim denklemleri dönmenin etkilerini içerecek şekilde yeniden düzenlenerek kütlesi $4 M_{\odot}$ ve Pop. I kimyasal yapısındaki yıldızın evrimi kararlılık eşiğinden anakola kadar incelendi. Hesaplamalar kararlılık eşiğinde yıldızın toplam açısal momentumu (CGS birimleriyle) $J_1=0$ (normal evrim), $J_2=5.06 \times 10^{52}$ ve $J_3=9.30 \times 10^{53}$ alınarak yapılırken yıldızda açısal hız dağılımı konvektif bölgelerde bütünsel, radyatif bölgelerde ise lokal açısal momentumu koruyacak şekilde seçilmiştir. Evrim süresince yıldızdan dönme sonucu kütle atımı gerekli koşullara uyularak hesaplanmıştır.

Yıldız kararlılık eşiğinde J_3 açısal momentumuna sahip olduğunda, evrimi ilerledikçe ekvator bölgesinden kütle atarak toplam kütesinin %19'unu kaybettiğinde muhtemelen yakın çift yıldız sistemine dönüştüğü görüldü.

Dönen yıldız (J_2 açısal momentumu olan) için kuramsal evrim yolu H—R diyagramında çizilerek normal yıldızınki ile karşılaştırıldı. Dönen yıldız daha düşük ortalama yüzey sıcaklığına ve aydınlatma gücüne sahiptir. Anakola girişte yüzey sıcaklıkları ve aydınlatma güçleri sırasıyla normal yıldız için $T_e=1.53 \times 10^4$ °K, $L=201 L_{\odot}$ ve dönen yıldız için $T_e=1.32 \times 10^4$ °K, $L=148 L_{\odot}$ 'dır. Dönen yıldız iç sıcaklıkları daha düşük ve merkezde basıncı daha yüksektir.

Normal yıldız kararlılık eşiğinden anakola 3.95×10^6 yılda varırken, dönen yıldız 5.16×10^6 yılda varır.

Normal yıldızların evrimleri geniş olarak çalışılmıştır. (Bu konudaki kaynakçalar için aşağıdaki çalışmalara bakılabilir : (I. Iben, 1974; Eryurt—Ezer, 1981; Eid et. al., 1983; Mercer—Smith et. al., 1984). Dönen yıldızların evrim çalışmaları ise anakol ve anakol sonrası için belirli koşullar altında yapılmıştır. Dönen yıldızların anakol öncesi evrim çalışmaları tam olarak bugüne kadar yapılmamıştır; yalnızca Bodenheimer ve Ostriker (1970), Bisnovatyi—Kogan et. al. (1979) anakol öncesinin bazı evrelerini çalışmışlardır. Dönen yıldızların anakol öncesi evrim çalışmalarının eksik olmasının nedenleri aşağıda belirtilen konularda bulunan bilgi yetersizliğidir.

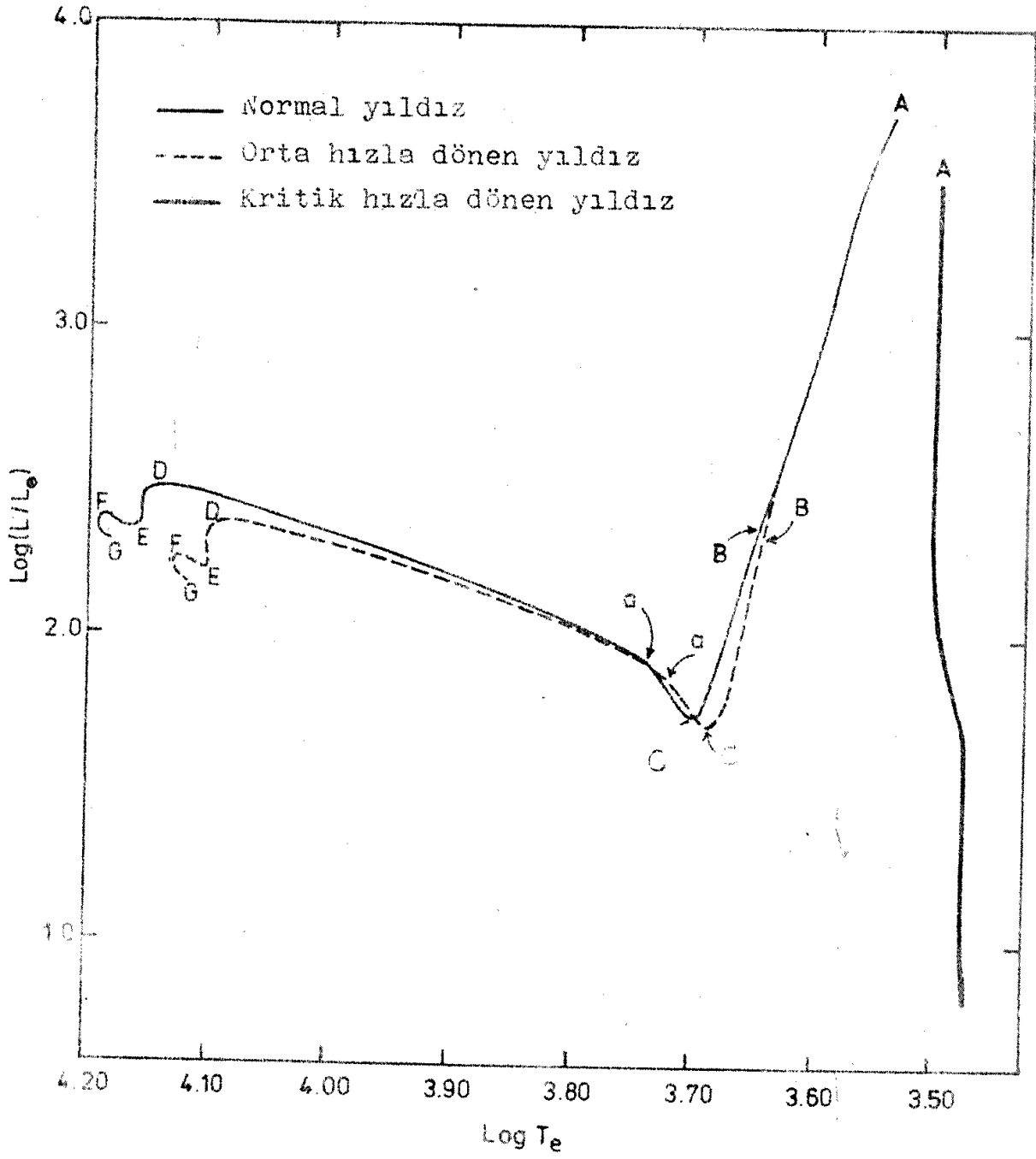
- 1) Yıldızlarda açısal momentumun korunumu.
- 2) Yıldızların içinde açısal hız dağılımı.
- 3) Dönmenin muhtemel etkilerinin incelenmesi (örneğin, kütle atımı, çift yıldız fizyonu).

Bu çalışmada, $4M_{\odot}$ kütleli Öbek I kimyasal kompozisyonuna sahip bir yıldızın anakol öncesi evrimi, açısal momentumun korunumu ve yıldızın yapısına bağlı bir açısal hız dağılımı kabul edilerek, enerji kararlılık eşiğinden sıfır yaş anakola kadar incelenmiştir.

Açısal hız yıldızın konvektif bir bölgesinde bütünsel, radyatif bir bölgesinde ise lokal açısal momentumu koruyacak şekilde seçilmiştir. Dönen yıldızın modeli, küresel yıldız modeline dönmenin ortalama etkileri eklenerek yapılmıştır. Kütle atım hızı, (1) bir kütle atım fonksiyonu, (2) açısal momentumun korunumu ve (3) hızlı dönen yıldızın ekvator bölgesinde merkezkaç kuvvetin kütle çekim kuvvetine eşitliği koşulu kullanılarak yıldızın yapısına bağlı bir şekilde analitik ifadelerle hesaplanmıştır.

Başlangıç koşulları olarak $4M_{\odot}$ kütlesi, Öbek I yıldızlarının tip kimyasal kompozisyonu olan hidrojen ve ağır element bollukları sırasıyla $X=0.762$ ve $Y=0.015$ alınmıştır; ayrıca yıldızın enerji kararlılık eşiğindeki toplam açısal momentumu (CGS birimleriyle) $J_1=0$ (normal yıldız), $J_2=5.06 \times 10^{51}$ (orta hızla dönen yıldız) ve $J_3=9.30 \times 10^{52}$ (kritik hızla dönen yıldız) seçilerek hesaplamalar yapılmıştır. Enerji kararlılık eşiği yıldızın toplam enerjisinin ilk defa eksi olduğu yerdir. Kritik dönme hızı ise yıldızın ekvator bölgesinde merkezkaç kuvvetin kütle çekim kuvvetine eşit olduğu dönme hızıdır. Aşağıdaki şekilde anakol öncesi hesapları yapılan yıldızların Hertzsprung–Russell (H–R) diyagramında evrim yolları gösterilmiştir. Evrim yollarındaki A noktası enerji kararlılık eşiğini, B noktası radyatif iç bölgenin oluşmaya başladığı yeri, C noktası lokal minimumu, D noktası 1. maksimumu, E noktası 1. minimumu ve G noktasında sıfır yaş anakolu göstermektedir. Aşağıdaki tabloda da yukarıda adı geçen bazı noktalarda normal ve orta hızla dönen yıldızların bazı özellikleri verilmiştir. Tabloda ikinci ve üçüncü sütunlar evrim zamanlarını, dördüncü ve beşinci sütunlar ortalama yarıçapları, altıncı ve yedinci sütunlar ortalama etkin sıcaklıkları, sekizinci ve dokuzuncu sütunlar ışıma güçlerini, onuncu ve on birinci sütunlar merkez sıcaklıklarını, on ikinci ve on üçüncü sütunlar da merkez basınçlarını göstermektedir.

Enerji kararlılık eşiğinde normal ve orta hızla dönen yıldızlar aynı yapıdadırlar. Normal yıldız H–R diyagramında evriminin başlangıç evrelerinde yaklaşık aşağı doğru bir yol izler. Burada yıldız bütünüyle konvektif bir yapıdadır. Şekilde görülen B noktasında merkezdeki sıcaklık ve enerji akışından dolayı radyatif bir iç bölge oluşmaya başlar ve bu bölge genişleyip yıldızın önemli bir bölümünü, yaklaşık %83'ünü, kapsayınca ışıma gücünün azalması durur ve yükselmesi başlar. Aynı zamanda etkin sıcaklıkta artar. Bu nedenlerden dolayı evrim yolunda lokal bir minimum noktası (şekilde C ile gösterilen) oluşur. Yıldızın bütünü radyatif olduktan sonra (şekilde a noktasından sonrası) ışıma gücü çok yavaş artar; etkin sıcaklık ise hızlı artar. Merkezdeki sıcaklık "ilkel" karbonu yakacak dereceye ulaşınca, kısaca $C^{12} \rightarrow N^{14}$ ile gösterilen karbon tepkimeleri işlemeye başlar. Bu tepkimeler yüksek miktarda enerji ürettiğinden dolayı yıldızın iç bölgesi genişler ve bu yüzden yıldızın ışıma gücü azalmaya başlar. Böylece 1. maksimum (şekilde D noktası) oluşur. C^{12} yanması bitince iç bölge çekimsel büzölmeye uğrar ve sonuç olarak yıldızın ışıma gücü tekrar artar. Bu olaylardan dolayı da 1. minimum (şekilde E noktası) oluşur. İç sıcaklık artmayı sürdürür ve hidrojen tepkimeleri carbon–nitrojen–oksijen (CNO) –çevrimiyle etkin olarak başlayınca ışıma gücü tekrar azalır ve böylece 2. maksimum (şekilde F noktası) oluşur. Yıldızın yarıçapı ve ışıma gücü minimum olunca da (şekilde G noktası), tanım olarak yıldız anakola gelmiş olur. D, E, F ve G noktalarında yıldızın iç bölgesi konvektif bir yapıdadır ve



Sekil : H-R diyagramında dört güneş kütleli Öbök I yıldızının değişik başlangıç dönme hızlarıyla çalışılmış anakor öncesi evrim yolları.

TABLO

Normal ve orta hızla dönen $4M_{\odot}$ Öbek I yıldızlarının önemli evrim yerlerindeki bazı özellikleri
(Q^d şeklindeki değişkenler orta hızla dönen yıldızla aittir).

Evrim t(vil) yeri	t^d (vil)	R	R^d	T_e	T_e^d	$L(L_{\odot})$	L^d	T_m	T_m^d	P_m	P_m^d
A 0	0	199	199	3.47×10^3	3.47×10^3	5.13×10^3	5.11×10^3	1.52×10^5	1.52×10^5	1.15×10^8	1.15×10^8
C 3.99×10^5	3.58×10^5	10.3	10.4	5.01	4.90	5.55×10	5.15×10	3.01×10^6	2.99×10^6	3.45×10^{13}	3.50×10^{13}
D 1.75×10^6	1.76×10^6	3.16	3.43	1.38×10^4	1.23×10^4	3.02×10^2	2.34×10^2	1.88×10^7	1.86×10^7	4.97×10^{16}	5.35×10^{16}
E 2.00	2.06	2.39	2.70	1.45	1.26	2.23	1.63	2.27	2.21	7.31	7.42
F 2.10	2.21	2.24	2.53	1.54	1.35	2.44	1.79	2.43	2.40	1.02×10^{17}	1.10×10^{17}
G 3.95	5.16	2.04	2.35	1.55	1.32	2.01	1.48	2.54	2.49	1.08	1.13

bu bölgenin büyüklüğü çekirdek tepkimelerine bağlı olarak değişir.

Orta hızla dönen yıldızın normal yıldızla benzer bir anakol öncesi evrim yaşamı vardır. Yalnız dönme, açısal momentumun korunumu ve dönme hızının zamanla artması yüzünden yıldızın ışına gücünü ve etkin sıcaklığını artan ölçüde azaltır. Dönmenin etkileri şekilde ve tabloda açık olarak görülmektedir. $4M_{\odot}$ kütleli Öbek I yıldızında dönmenin ana etkileri kısaca şunlardır :

- 1) Yıldız genişletme (ortalama yarıçapın büyümesi).
- 2) Işıma gücünü ve ortama etkin sıcaklığı azaltma.
- 3) Evrim zamanlarını uzatma.
- 4) Merkez sıcaklığı azaltma ve merkez basıncı artırma.
- 5) Çekirdek tepkimesi hızlarını yavaşlatma ve anakolda tepkime olan bölgeyi küçültme.
- 6) Merkeze doğru kütle yoğunlaşmasını artırma.

Normal $4M_{\odot}$ Öbek I yıldızının evrimi I. Iben (1965), Ezer ve Cameron (1967)'un $3M_{\odot}$ ve $5M_{\odot}$ Öbek I yıldızları üzerine yaptıkları çalışmalardan türetilen sonuçlarla uyusmaktadır. Orta hızla dönen yıldızın anakol ve anakol öncesi dönme hızları Bernacca (1972), Vogel ve Kuhl (1981), Smith et. al. (1983)'ün yaptığı gözlemsel çalışmalarla karşılaştırılabilir sınırlar içindedir. Ayrıca bu çalışma, erken tip yıldızların H-R diyagramındaki anakol bandının genişliğinin diferansiyel dönmenin etkileriyle açıklanabileceğini göstermiştir.

Kritik hızla dönen yıldızın ilk modeli, hesaplamalardan dolayı $t = 0.7$ yılında (şekilde A noktası) elde edilmiştir. A noktasında bütünüyle konvektif bir yapıda olan yıldızın ışına gücü ve ortalama etkin sıcaklığı sırasıyla $L = 3.01 \times 10^3 L_{\odot}$ ve $T_e = 2.95 \times 10^3 \text{ }^{\circ} \text{K}$ 'dir. Yıldız kütle atarak evrimini sürdürür ve evrim yolu H-R diyagramında aşağı doğrudur; yani ortalama etkin sıcaklık sabit kalmakta ve ışına gücü azalmaktadır. Yıldız kütle attıkça daha küçük kütleli bir yıldıza dönüşmektedir. Ayrıca maksimum dönmenin diğer etkileri de vardır. Bütün bu nedenlerden dolayı yıldız yukarıda açıklanan evrim yolunu izler. Bu yıldızın içinde de zamanla radyatif bir bölge oluşur. Fakat radyatif bölge yıldızın %63'ünü kapsayınca yıldız dönmeden dolayı kararsız bir duruma gelir. Bu noktada yıldızın merkezinde merkezkaç kuvvetin kütle çekim kuvvetine oranı 0.187'yi geçmekte ve muhtemelen yıldız bir değen çift yıldız sistemine dönüşmektedir. Şekilde evrim yolunun sonuna karşı gelen bu noktada, yıldızın ortalama yarıçapı $R = 9.96R_{\odot}$ ve kütlesi $M = 3.24M_{\odot}$ 'tir. Eğer çift yıldız sistemine dönüşüm oluyorsa, Brancewicz ve Dworak (1980)'ün hazırladığı tutulan çift yıldızlar kataloğundaki yıldızlardan toplam kütlesi $M \cong 3.34M_{\odot}$ olan BO Peg sisteminin tek yıldızdan evrimleşmiş bir örnek olması muhtemeldir. (Bu sistem üzerinde yapılacak gözlemsel çalışmalar konuya açıklık getirebilir.)

$m = 3.05 \times 10^{-3} M_{\odot} / \text{yıl} - 1.28 \times 10^{-7} M_{\odot} / \text{yıl}$ aralığında elde edilen kütle atım hızları Kuhl (1964) ve DeCampi (1981)'nin yıldızlardan kütle atım hızları üzerine yaptığı gözlemsel çalışmalarla uyum içindedir.

KAYNAKLAR

- Bernacca, P. L. : 1972, *Ap. J.*, 177, 171.
- Bisnovatyi—Kogan, G. S., Blinnikov, S. I., Kostyuk, N. D., ve Fedorova, A. V., *Sov. Astron.*, 23, 432.
- Bodenheimer, P., ve Ostriker, J. P. : 1970, *Ap. J.*, 161, 1101.
- Brancewicz, H. K., ve Dworak, T. Z. : 1980, *Acta Astronomica*, 30, 501.
- DeCampi, W. M. : 1981, *Ap. J.*, 244, 124.
- Eid, M. F., Fricke, K. J., ve Ober, W. W. : 1983, *A. Ap.*, 119, 54.
- Eryurt—Ezer, D. : 1981, *Ap. Sp. Sci.*, 79, 625.
- Ezer, D., ve Cameron, A. G. W. : 1967, *an. J. Phys.*, 45, 3429.
- I. Iben, Jr. : 1965, *Ap. J.*, 142, 993.
- I. Iben, Jr. : 1974, *Ann. Rev. A. Ap.*, 12, 215.
- Kuhi, L. V. : 1964, *Ap. J.*, 140, 1409.
- Mercer—Smith, J. A., Cameron, A. G. W., ve Epstein, R. I. : 1984, *Ap. J.*, 279, 363.
- Smith, M. A., Beckers, J. M., ve Barden, S. C. : 1983, *Ap. J.*, 271, 273.
- Vogel, S. N., ve Kuhi, L. V. : 1981, *Ap. J.*, 245, 960.