

Yıldız Astrofiziğine Yeni Bir Kavram Önerisi – Etkin Kütle

Mutlu Yıldız

Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, Bornova, 35100 İzmir
yildiz@astronomy.sci.ege.edu.tr

Özet: Erken tip yıldızların iç dönmelerinin ihmal edilemeyecek kadar oldukları durumda ışınm güçleri kütlelerine göre çok düşük kalacak, sanki yıldız daha küçük bir kütleyle sahipmiş gibi bir izlenim verecektir. Çift-çizgili örten çift yıldız sistemi PV Cas'ın bileşenleri için yapılan, farklı dönme özelliklerine sahip modellerden, ortalama iç dönmenin ($\bar{\Lambda}$) bir fonksiyonu (aynı zamanda bir ölçütü) olan etkin kütle kavramını, yıldız iç yapı ve evrimini daha iyi anlayabilmek için, öneriyoruz. Etkin kütle $M_{\text{etk}}(\bar{\Lambda}) \equiv M(1 - \bar{\Lambda})^{1.75}$ şeklinde ifade edilebileceğini tespit ettik. Gerçekte, ışınm gücünü, gerçek kütle yerine, etkin kütle belirlemektedir. Bazı çift yıldızlar için kütle-ışınm gücü bağıntısı için (gerçek kütle kullanılması nedeniyle) çok küçük değerler bulunmasının nedeni de bu olabilir. Öte yandan, etkin kütle, kimyasal olarak tuhaf olan yıldızlar için de ayırd edici bir özellik olabilir.

Anahtar kelimeler: yıldızlar: dönme – yıldızlar: iç yapı – yıldızlar: evrim – yıldızlar: erken-tip

Abstract: In the case that internal rotation of the early-type stars is not negligible, their luminosity are very low according to their mass, as if their masses are somewhat lower than their real masses. From models with a rich variety of rotational properties for the components of the double-lined eclipsing binary PV Cas, we introduce *effective mass* concept for better understanding of stellar structure and evolution, and derive an expression for it as a function of mean rotational parameter $\bar{\Lambda}$: $M_{\text{eff}}(\bar{\Lambda}) \equiv M(1 - \bar{\Lambda})^{1.75}$. In fact, luminosity of a star is determined by its *effective mass* rather than its real mass. This may be reason of why values found for mass-luminosity relation are very low for some binaries. On the other hand, *effective mass* can also be a discriminating property for chemically peculiar stars.

Key words: stars: rotation – stars: interiors – stars: evolution – stars: early-type

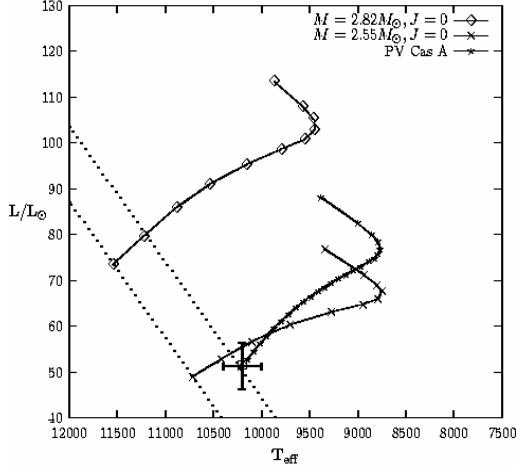
1. Giriş

Yıldızların iç yapısını ve evrimini anlamamız için geleneksel kavramsal araçlar A-tipi yıldızların bir çok önemli gözlemsel özelliklerini açıklamakta yetersiz kalmaktadır. Bu bakımdan, dönmenin yok sayıldığı veya katı cisim gibi olduğu varsayımları belki de standart modellerin en önemli eksik yanıdır. Aslında, derinliğe bağlı diferansiyel dönme, en azından bir süre için, çökmenin doğal bir sonucu olarak beklenmelidir, yeterki yıldız içyapı koşullarında açısal momentum aktarımı anlık bir işlem olmasın. Bu durumda, yıldızların yoğun merkezi kısımları daha seyrek dış kısımlara göre çok daha hızlı dönmelidir. Böyle bir diferansiyel dönmenin zamanla evrimi katman katman açısal momentum aktarımına bağlıdır. Her ne kadar, günümüzde, bu aktarım işlemi hakkında kesin bir bilimiz yoksa da, A- ve B-tipi yıldızların iç kısımlarının dış kısımlarına göre çok daha hızlı

döndüğüne ilişkin çok güçlü kanıtlar var (bakınız, Yıldız 2004a).

Bu çalışmada, dönmenin model özellikleri üzerindeki etkisini biraz daha ayrıntılı irdeliyor ve *etkin kütle* kavramını ilk kez kullanarak, iç kısımların hızlı dönmesinden dolayı ortaya çıkan bazı temel düzensizlikleri açıklamaya çalışıyoruz. Bunu yapmamızdaki başlıca motivasyon PV Cas A (Barembaum ve Etzel 1995) için yapılan diferansiyel dönen model ile 2.55M_☉ kütleli dönmeyen modelin kıyaslanmasından gelmektedir. Şekil 1'de bu modeller (metale zengin) HR diyagramına çizilmiştir: Bunlardan ilki ★ ile gösterilirken, ikincisinin evrimsel izi x ile gösterilmektedir. Daha açık bir kıyaslama için 2.82M_☉ lik dönmeyen model de bu şekilde gösterilmiştir (◇). Bu çeşit bir diferansiyel dönme 2.82M_☉ lik PV Cas A'nın yapısını ve evrimini 2.55M_☉ lik dönmeyen bir modelinkine çok yakın olmasına yol açmaktadır. Böylece, belirli bir kütleyle sahip diferansiyel dönen bir modelin yapısı ve evrimi sanki daha küçük kütleli bir yıldızmış gibi gerçekleşmektedir.

Bu şekilde, iki sıfır-yaş-ana-kol (SYAK) çizgisinin (birisi dönmeyen diğeri de PV Cas A'nın gibi diferansiyel dönen modeller için) arasındaki etkin sıcaklık farkına da dikkat edelim; verilen bir ışıngücü için, bu fark Hubrig ve ark. (2000) tarafından manyetik Ap ve *normal* yıldızların etkin sıcaklıkları arasındaki farkla aynıdır.



Şekil 1. PV Cas A'nın gözlenen ışıngücü, kütlelerine göre o kadar düşük ki, $2.82 M_{\odot}$ kütleli modelinkinden ($\diamond$) ziyade, $2.55 M_{\odot}$ kütleli dönmeyen bir modelinkiyle ($\times$) aynı düzeydedir. PV Cas A'nın modelini gözlemlere uyarlamak için diferansiyel dönmeye gereksinim duyulmaktadır ($\star$). Noktalı iki koşut çizgi, dönmeyen (alttaki) ve diferansiyel dönen modeller (üstteki) için SYAK çizgilerini temsil etmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları esas olarak PV Cas'ın baş yıldızının kütlelerine sahip ve dönme özellikleri bakımından çok çeşitli olan modellere dayanmaktadır (Yıldız 2004b). Bildirinin geriye kalanı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de dönmenin temel etkileri irdelenmekte ve dönmeyen modellerle katı bir cisim gibi dönen modellerin nicelikleri arasındaki bazı ilişkiler sunulmaktadır. Homojen kütle dağılımı olduğu durumda etkin kütle için analitik bir açıklama Bölüm 3'te türetilirken, daha gerçekçi bir durum için benzer bir açıklama Bölüm 4'te elde edilmektedir. Son olarak, sonuçlar Bölüm 5'te yorumlanmaktadır.

2. Dönmenin Temel Etkileri

Dönmenin hidrostatik denge üzerindeki ortalama etkisi, dönme parametresi Λ_r cinsinden,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM_r \rho}{r^2} (1 - \Lambda_r) \quad (1)$$

şeklinde verilebilir (Kippenhahn ve ark. 1970). Dönme parametresi,

$$\Lambda_r = \frac{2 \Omega^2 r^3}{3 GM_r} \quad (2)$$

olarak tanımlanmıştır.

Çekimsel kuvvete ters yöndeki merkez kaç kuvvetinin radyal bileşeninden ötürü, dönen bir yıldızın merkezi bölgeleri üst katmanların kütlelerini olduğundan daha az hissedecektir. Bunun sonucu olarak, dönen bir modelin merkez sıcaklığı dönmeyen eşleşmişinden daima daha az ve bu nedenle de ilki sonrakinden her zaman daha sönük olacaktır. Katı-cisim gibi dönme durumunda, örneğin, dönen modelin ışıngücünün (L) dönmeyen modelin ışıngücü (L_o) ve dönme parametresinin yüzeydeki değeri (Λ_s) cinsinden

$$L = \frac{L_o}{(1 + \Lambda_s)^{0.25}} \quad (3)$$

biçiminde ifade edebiliriz. Benzer şekilde, yarıçap için de,

$$R = R_o (1 + \Lambda_s)^{0.45} \quad (4)$$

buluyoruz.

Amacımız benzer ilişkileri acaba diferansiyel dönen modellerin ışıngücü ve yarıçapı için de bulabilirmiyiz sorusuna yanıt bulmaktır. Ancak, yarıçapın, ışıngücüne göre, dönme profilinin daha karmaşık fonksiyonu olduğunu hemen belirtelim ve bir modelin merkez koşulları ile toplam kütle ve dönme özellikleri arasında nasıl bir ilişki olduğunu görelim.

3. Homojen Kütle Dağılımı Durumunda Etkin Kütle

Bütün üst katmanlar merkez bölgeler üzerinde baskı uygularken, dönme bu baskının derecesini bir ölçüde azaltır: merkezdeki fiziksel koşullar sanki üst katmanların kütleleri gerçek kütlede daha azmış gibi şekillenir. Merkezdeki bu fiziksel koşullar ile toplam kütle (M) arasında bir ilişki ve bu ilişkinin dönme tarafından nasıl etkilendiğini saptamak için, homojen bir kütle dağılımının olduğunu varsayalım. Kütlelerin sürekliliği denklemini kullanarak, Denk. 1'i merkezden yüzeye integre edersek,

$$\frac{P_c}{c \rho_o^{4/3}} = \frac{\mathfrak{K}}{\mu} \frac{T_c}{c \rho_c^{1/3}} = \frac{3}{2} M^{2/3} (1 - \bar{\Lambda}) \quad (5)$$

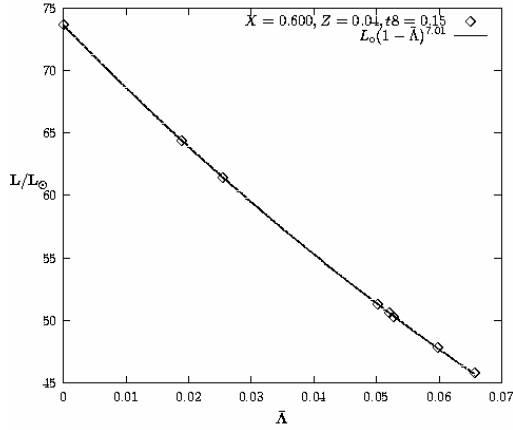
sonucunu buluruz. Yukarıdaki denklemde ortalama dönme parametresi $\bar{\Lambda}$

$$\bar{\Lambda} \equiv \frac{2}{3M^{2/3}} \int_0^M \frac{dM_r}{M_r^{1/3}} \Lambda_r \quad (6)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Basit olsun diye, sadece gaz basıncını gözönünde tuttuk. Aslında, Denk. 5 örtük bir şekilde, dönmenin olduğu bir durumda, kütle-ışınım gücü ilişkisini ifade etmektedir: nükleer tepkimelerin gerçekleştiği merkezdeki fiziksel koşullar toplam kütle ve dönme parametresi tarafından belirlenmektedir (verilen bir kimyasal kompozisyon için). Dahası, bu koşullar, kütleleri birbirinden çok farklı iki yıldız için çok benzer olabilir, yeterli her birinin toplam kütle ve dönme parametreleri Denk. 5'in sağ tarafı için aynı değeri versin. Bu bağlamda, *etkin kütleyi* (M_{etk})

$$M_{\text{etk}} \equiv M(1 - \bar{\Lambda})^{3/2} \quad (7)$$

şeklinde tanımlayabiliriz. Bu demektir ki, M kütleli ve $\bar{\Lambda} = 0.63$ olan bir modelin merkez fiziksel koşulları $M/2$ kütleli dönmeyen bir modelinkiyle aynıdır.



Şekil 2. Çeşitli dönme özelliklerine sahip 2.82 $M_{\odot}$ kütleli modellerin $t=15$ My'daki ışınlı gücünün ortalama dönme parametresine göre değişimi.

4. PV Cas A'nın Etkin Kütle

Homojen kütle dağılımının ifade ettiğinden daha gerçekçi bir durum için, çeşitli dönme özelliklerine sahip 2.82 $M_{\odot}$ kütleli modeller oluşturulmuş. Şekil 2'de bu modellerin $t = 15$ My'daki ışınlı güçleri ortalama dönme parametresine ($\bar{\Lambda}$) göre çizilmiştir ($\diamond$). Şekildeki çizgi $L = L_0(1 - \bar{\Lambda})^{7.01}$ uyarlama

formülünü göstermektedir, L_0 dönmeyen modelin ışınlı gücü olmak üzere. İstisnasız bütün noktalar bu eğri üzerinde yer almaktadır.

Etkin kütle için açıklama bulabilmek için, 2.82 $M_{\odot}$ ve 2.55 $M_{\odot}$ kütleli, metalce zengin, dönmeyen modeller kullanılarak elde edilen kütle-ışınlı gücü ilişkisinden yararlanabiliriz; $L = cM^4$. O zaman,

$$M_{\text{etk}}(\bar{\Lambda}) \equiv M(1 - \bar{\Lambda})^{7.01/4} \quad (8)$$

Metalce zengin kimyasal kompozisyonlu diferansiyel dönen modelin etkin kütleliğini, yukarıdaki denklemi kullanarak, 2.58 $M_{\odot}$ olarak buluyoruz. Benzer bir şekilde, Güneş kompozisyonu ile PV Cas A için elde edilen modelin etkin kütleliğini de 2.60 $M_{\odot}$ olarak buluruz. Her iki kimyasal kompozisyon için de bulduğumuz etkin kütle hemen hemen aynıdır.

Yukarıda vurgulandığı gibi, etkin kütle yıldızların yapısını olduğu kadar evrimini de belirler. Modellerin ana-kol ömürlerini kıyaslırsak bunu açık bir şekilde görebiliriz: 2.82 $M_{\odot}$ kütleli dönmeyen modelin anakol ömrü 280 My iken, 2.57 $M_{\odot}$ kütleli dönmeyen modelin ömrü 2.82 $M_{\odot}$ kütleli diferansiyel dönen modelinki (etkin kütlesi 2.58 $M_{\odot}$) 370 My olmaktadır.

Etkin kütle kullanımı PV Cas sistemi için gözlenen kütle ışınlı gücü ilişkisinin neden bu kadar düşük olduğunu da açıklayabilir:

$$\frac{\Delta \log L}{\Delta \log M} = 2.3 \quad (9)$$

PV Cas A ve B'nin modellerinden bu ilişki için elde edilen en küçük değer 4'tür. Eğer gerçek kütlelerin yerine etkin kütleleri kullanırsak, kuramsal değere çok yakın olan 3.6 buluyoruz.

5. Sonuç

Son zamanlarda, bazı erken tip yıldızların (eğer hepsinin değilse) iç kısımlarının çok hızlı döndüğüne ilişkin güçlü kanıtlar ortaya konmaktadır. Böyle bir dönmenin yıldız yapı ve evrimine etkilerini daha yalın ve ayrıntılı anlayabilmek için etkin kütle kavramını önerdik ve işlevselliğini vurgulamaya çalıştık. PV Cas A'nın kalibre edilmiş modellerinden bulduğumuz sonuçlara göre, diferansiyel dönmeyen bir sonucu olarak, yıldızın etkin kütleleri gerçek kütlelerinden %10 daha azdır. Yıldız evrimi açısından ilginç olan diğer bir sonuç ise, diferansiyel dönen bir modelin

ana-kol ömrünün de etkin kütlesi tarafından belirlenmesidir.

PV Cas çift yıldız sisteminin ışık eğrisinde Ap benzeri değişimlerin gözlenmesi, acaba, bazı (ya da bütün) Ap yıldızlarının benzer bir dönme özelliği gösterip göstermediği sorusunu akla getirmektedir. Bu bakımdan, belki, Ap yıldızlarının etkin kütlesinin gerçek kütlesine oranı diğer yıldızlara göre daha düşüktür.

Etkin kütle kavramı, bazı örten çift yıldız sistemlerinde neden kütle-ışınım gücü ilişkisi için çok küçük değerlerin gözlemlendiğini de açıklamaktadır. Ayrıca, bu kavramın kozmolojik sonuçları da olabilir.

6. Kaynaklar

- Barembaum, M.J. ve Etzel, P.B. 1995, AJ 109, 2680
Hubrig, S., North, P. ve Mathys, G. 2000, ApJ 539, 352
Kippenhahn, R., Meyer-Hofmeister, E. ve Thomas, H.-C. 1970, A&A 5, 155
Yıldız, M. 2004a, The A-Star Puzzle, IAUS No:224, Ed. J. Zverko vd., Cambridge University Press, baskıda.
Yıldız, M. 2004b, A&A, gönderildi