

Rölativistik Çift Yıldızlar: Gravitasyonel Dalgalar

Kadri Yakut*

Ege Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü, İzmir

Özet Bu çalışmada, karadelik, nötron yıldızı, beyaz cüce ve dejenere olmayan bileşenli dizgelerden oluşan rölativistik ve rölativistik olmayan etkileşen çift yıldız sistemlerinin evrimlerinde çekim dalgaları ve manyetize olmuş yıldız rüzgarları ile madde kaybı yoluyla açısal momentum kayıp mekanizmalarının çift dizgenin evrimindeki önemi tartışılmıştır. Bu kapsamda başta çekim dalgalarının çift dizgenin evrimi üzerindeki etkisi olmak üzere açısal momentum kayıp mekanizmaları ve kayıpların zaman ölçekleri Hubble zamanı referans alınarak incelenmiştir.

1 Giriş

Tek bir yıldızın evrimi, başta kütle olmak üzere kimyasal bolluk, karışım uzunluğu gibi parametrelere bağlı iken çift yıldızların evrimi ise kütle, kimyasal bolluk ve karışım uzunluğuna ek olarak çifti oluşturan yıldızların toplam kütlelerine, kütle oranına ve yörünge dönemine bağlıdır. Çift yıldız evrimi çalışılırken başlangıç kütleleri, kütle oranı ve döneme kuvvetle bağlı olduğundan ayrı birer yıldız evrimi gibi ele almak (özellikle de yakın çift dizgeler için) bizi yanlış sonuçlara götürür. Yakın çift yıldızın evriminin bazı evrelerinde nükleer evrim baskın ve önemli iken bazı evrelerinde ise açısal momentum kaybı ve/veya bileşenler arasında kütle transferi önemli olur. Bileşen kütleleri $1.19 M_{\odot}$ ve $0.94 M_{\odot}$, dönemi 0.75 gün olarak evrimleşen geri tür ayrık yakın bir çift dizge korunumsuz kütle kayıp mekanizması ile evrimleşerek yaklaşık 2 milyar yıl sonra yarı-ayrık bir çift dizge ve kabaca 100 milyon yıl sonra da değen bir çift dizge durumuna geçer. Değme durumuna vardığında ise birinci bileşenin kütlesi $0.88 M_{\odot}$, ikinci bileşenin kütlesi $0.91 M_{\odot}$ ve yörünge dönemi ise 0.28 gün olur (Yakut & Eggleton, 2005).

Başlangıç kütlelerine bağlı olarak yıldız evrimi sıkışık gök cisimleri olarak bilinen beyaz cüce, nötron yıldızı veya karadelik ile son bulur. Bu gök cisimleri bize sıkışık madde fiziği çalışmanın yanısıra yüksek değerlerdeki enerji, manyetik alan ve dönmeleri ve bunların sonuçlarını çalışma olanağı sağlar. Sıkışık gök cisimleri eğer bir çift dizge üyesi ise onların fiziksel parametrelerini belirleyebilme olanağının yanısıra çekim dalgaları ile evrimlerini de çalışma olanağı sağlarlar (Yakut, Kalomeni, Tout, 2008).

Genel rölativite kuramını çalışmanın bir yolu da rölativistik çift yıldızları çalışmaktır. Rölativistik çift yıldızlar çekim dalgaları ile evrimin *önemli* olduğu

* kadri.yakut@ege.edu.tr

dizgelerdir. Bu önem derecesi genellikle Hubble zamanı mertebesinde olan zaman ölçeklerinde kabul edilir. Bazı düşük ve büyük kütleli x-ışın çiftlerini de kapsayan bu çift dizgeler karadelik, nötron yıldızı ya da bir beyaz cüce bileşeni olan çiftlerdir. Çift sıkışık gök cisimleri de bu grubun önemli adaylarındadır. Bu dizgelere ek olarak birbirine çok yakın ve büyük kütleli degen dizgeleri de bu sınıfın üyesi olarak gösterebiliriz. Bu sistemlerde evrimin tamamı ya da bazı aşamalarında çekim ışıması yolu ile açılmal momentum kaybı önemlidir.

2 Rölativistik Çift Dizgeler

Özellikle de son yirmi yıldaki gözlemsel astrofizikte yapılan hassas çalışmalar bize yakın çift dizgeler ve birçok x-ışın çift dizgesinin fiziksel parametrelerini belirleme olanağını sunmuştur. Bu sistemlerin parametrelerini kullanarak çift yıldız evrimi modellerimizi, genel rölativite, yörünge evrimi ve yüksek enerji bölgesindeki kuramlarımızı test etme olanağı sağlamıştır. Yakut, Kalomeni ve Tout (2008) gözlenmiş olan bu sistemleri toplamış ve hedef dizgelerin kütle dağılımını Tablo 1 de gösterildiği gibi vermiştir.

Çizelge 1. Rölativistik çift dizgelerde sıkışık gök cisimlerin kütle dağılımları. Burada KD, NY, BC, Y ve n kısaltmaları sırası ile, karadelik, nötron yıldızı, beyaz cüce, dejenere olmayan yıldız ve örnek sayısı anlamında kullanılmıştır.

Tip	n	M ₁		M ₂		
		max.	min.	max.	min.	
HMXRB	KD+Y	6	23.1	6.0	70	6.5
	NY+Y	11	2.4	1.0	58	8.8
LMXRB	KD+Y	13	14	4.0	2.7	0.37
	NY+Y	6	1.8	1.4	2.3	0.4
NLCV	BC+Y	39	1.4	0.3	1.1	0.05
mCV	BC+Y	10	0.8	0.4	0.5	0.1
PreCV	BC+Y	21	0.84	0.39	0.93	0.1
DD	NY+NY	8	1.6	1.14	1.4	1.05
	NY+BC	9	2.1	1.27	1.3	0.16
	BC+BC	10	0.7	0.32	0.7	0.29
AMCVn	BC+BC	5	0.98	0.59	0.13	0.011

Tablo 1 de elde edilmiş olan bu değerler bize sıkışık gök cisimlerinin kütle aralığını ortaya koymaktadır. Dönemlerini de dikkate aldığımızda bu sistemler bize çekim ışıması ile enerji kaybı hakkında bilgi verecektir.

3 Açılmal Momentum Kaybı

Gözlemsel astrofizikte en hassas şekilde belirlediğimiz parametrelerden biri çift dizgenin yörünge dönemidir. Yörünge dönemindeki olası değişimler bize değişimin kaynağı hakkında bilgi verir. Açılmal momentum kaybı dönem değişimi olarak karşımıza çıkacaktır. Bir çift dizgede açılmal momentum kaybı, manyetik frenleme (manyetize olmuş yıldız rüzgarları (MSW) yolu ile, korunumlu/korunumsuz

kütle kaybı, çift sistemin yörüngesini bozan üçüncü bir cisim ve/veya gravitasyonel dalgalar (GRR) ile olabilir. Bu etkiler ayrıntılı olarak Yakut ve Eggleton (2005) te tartışılmıştır. Tablo 1 de verilen rölativistik çift adaylar genelde MSW ve GRR yolu ile açılcal momentum kaybederler.

Bir çift sistemin toplam açısal momentumu hem yıldızın dönmesinden kaynaklı spin açısal momentumu (H^s) hem de dolanmasından kaynaklı yörünge açısal momentumun (H^o) toplamıdır (H^t). Yakın bir çift dizgede spin açısal momentumu Denklem 1 ile gösterildiği gibi hesaplanır.

$$H_1^s = I\omega = k^2 R_i^2 M_i \omega_i, \quad (1)$$

Denklem 1 de, i ilgili bileşeni, I atalet momenti, ω dönme hızı, k^2 gyroton yarıçapı, R yarıçap ve son olarak M bileşenin kütesini göstermektedir. Benzer şekilde toplam yörünge açısal momentumu ise Denklem 2 deki gibi hesaplandı.

$$H_t^o = M_1 M_2 \sqrt{\frac{Ga(1-e^2)}{M}} = 111q(1+q)^{-2} \left(\frac{M_t}{M_\odot}\right)^{-5/3} \left(\frac{P}{\text{day}}\right)^{1/3} \sqrt{1-e^2} (M_\odot R_\odot^2 / \text{day}) \quad (2)$$

Burada G genel çekim sabiti, a çift dizgenin yarı-büyük eksen uzunluğu ve $q (= \frac{M_2}{M_1})$ bileşen yıldızların kütleler oranını göstermektedir.

3.1 Manyetik Frenleme

Özellikle geri tür bileşene sahip rölativistik çift dizgelerde yıldız rüzgarı ile madde ve dolayısı ile momentum kaybı önemlidir. Güneş örneğinde kütle kaybı $10^{-14} M_\odot \text{ yr}^{-1}$ mertebesinde iken yakın çift dizgelere bu değer 10^{4-7} kat daha fazladır. Güneş'in ortalama dönme dönemi yaklaşık 27 gün iken yakın çift sistemlerde yörünge ile sekronize olmuş yıldız dönmesi bir günden küçük değerlerdedir. Bu da differansiyel dönmenin, konveksiyonun daha önemli olması ve dolayısı ile konvektif katmandaki manyetik alanın oluşumunu ve dinamonun etkin olması anlamına gelir. Bu etkinin fazlalığıda madde kaybını artırıcı bir etki doğurur.

Yıldız aktivitesinin önemli olduğu birçok gözlemsel çalışmalar mevcuttur ve bu etki kendini ışık değişimlerinde O'Connell etkisi olarak gösterir (Milone 1968). Gözlenmiş olan bir çok rölativistik çift dizgenin geri tür bileşen yıldızı ($M < 1.5 M_\odot$) bulunmaktadır. Bu nedenle bu sistemler incelenirken bu etkiyi de dikkate almalıyız. Skumanich (Skumanich 1972, Smith 1979) ilişkisinden başlayarak yıldız rüzgarları ile açısal momentum kaybını ve onun zaman ölçeğini şu şekilde türetebiliriz (Yakut, 2011).

$$\left(\frac{dH}{dt}\right)_{MSW} = -1.6 \times 10^{-30} M_2 R_2^4 \omega^3. \quad (3)$$

$$\tau_{MSW} = 14 \left(\frac{M}{M_\odot}\right)^{2/3} \left(\frac{R_2}{R_\odot}\right)^{-4} \left(\frac{P}{\text{day}}\right)^{10/3} (1+q)^{-1} (1-e^2)^{1/2} \times \text{Gyr}. \quad (4)$$

Burada yarıçap belirlenirken, eğer bileşen yıldız Roche-lobunu doldurmuş ise onun yarıçapı Eggleton (1983) tarafından verilen

$$R_2 = R_L = a \frac{0.49q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})}. \quad (5)$$

denklem ile hesaplanır.

3.2 Gravitasyonel Işıma

Özellikle sıkışık iki yıldızdan (KD+KD, KD+NY, NY+NY, *vb.*) oluşan çift dizgeler gravitasyonel ışıma yayımlayarak dizgeden açısal momentum taşırlar. Çift dizgenin biçimi ve enerjisi aşağıdaki denklemler ile belirlenir.

$$r = \frac{a(e^2 - 1)}{1 + e \cos \nu} \quad \text{ve} \quad E = \frac{-GM_1M_2}{2a}. \quad (6)$$

Çift dizgenin yarı-büyük eksen uzunluğunun zamanla değişim oranı (Landau & Lifshitz, 1951) ve buradan yolla çıkararak açısal momentum kayıp oranı ve onun zaman ölçeği aşağıdaki denklemlerde olduğu gibi elde edilir (Yakut, 2011).

$$\frac{da}{dt} = -\frac{64}{5} \frac{G^3}{c^5} \frac{M_1M_2}{a^3} (M_1 + M_2), \quad (7)$$

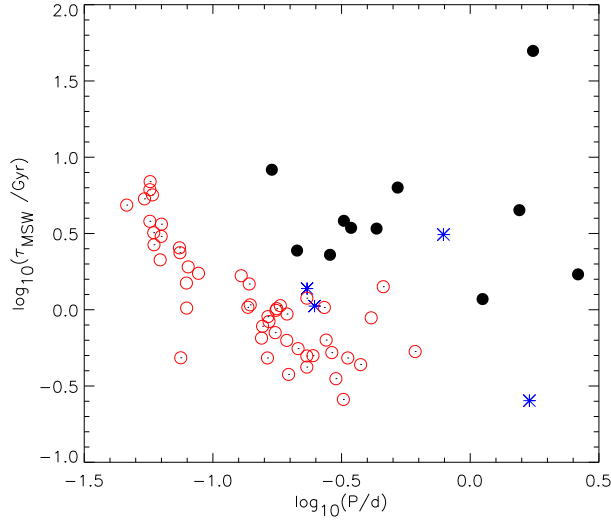
$$\left(\frac{dH}{dt} \right)_{GR} = -3.44 \times 10^{44} (M_1M_2M^{-1/3})^2 P^{-7/3} f(e) \quad (8)$$

$$\tau_{GR} = 376.4q^{-1}(1+q)^2 M^{-5/3} P^{8/3} (1-e^2)^{3/2} (1 + \frac{7}{4}e^2)^{-1} \text{Gyr}. \quad (9)$$

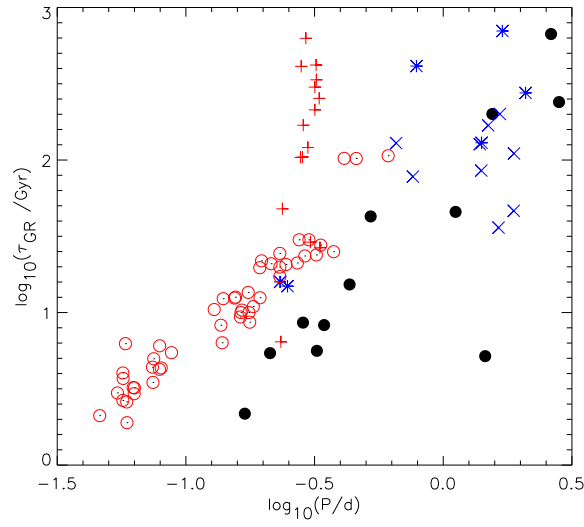
4 Sonuç ve Tartışmalar

Seçilen rölavistik olmayan ve rölativistik çift dizgelerdeki açısal momentum kayıp zaman ölçeği Şekil 1 - 3 gösterilmiştir. Şekil 1 bileşenlerinden biri dejenere olan yıldızlardan oluşan sistemlerin MSW ile evrimini gösterirken, Şekil 2 aynı sistemlerin GRR zaman ölçeğini göstermektedir. Benzer biçimde Şekil 3 her iki bileşeni de dejenere sistemlerin GRR ile açısal momentum kayıp zaman ölçeğini göstermektedir. Bu şekiller bize çift sistemin evriminde hangi mekanizmanın baskın olduğunu göstermektedir (*bkz.* Yakut 2010a, Yakut 2010b). Şekillerde özetlendiği gibi bazı sistemlerde, özellikle de AM Cvn sistemlerinde GRR ile evrim oldukça önemli iken bazı sistemler de ise GRR zaman ölçekleri oldukça büyüktür. Örneğin XTE J1118+480, J0737-3039AB, J1141-6545 sistemlerinde baskın mekanizma GRR iken 4U 0540-69 sisteminde MSW dir. Burada şunu da belirtmeliyiz ki daha ayrıntılı çalışma devam etmektedir ve bu grafikler ve sistemler takip eden çalışmada (Yakut, 2011) ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

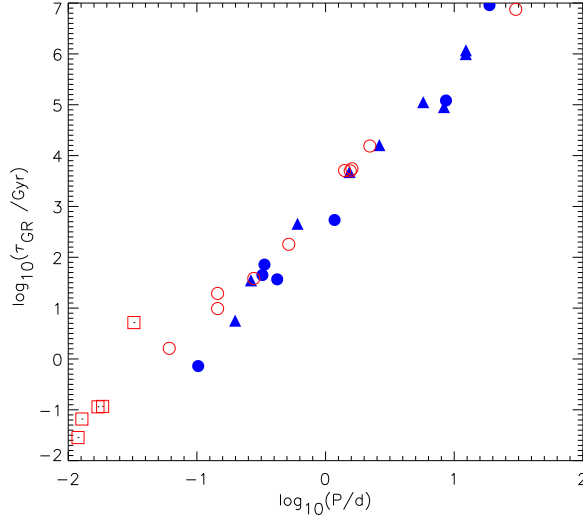
Einstein'nın genel görellik kuramının çıkarımlarından biri de bir çift dizge- den (galaksiler, yıldızlar veya gezegenler) gravitasyonel dalgalar yayınlanmasıdır.



Şekil 1. $\log \tau_{\text{MSW}}$ vs. $\log P$ diyagramı. Daire, yıldız ve içi dolu daireler sırası ile beyaz cüce, nötron yıldızı ve karadelik bileşenleri göstermektedir.



Şekil 2. $\log \tau_{\text{GR}}$ - $\log P$ diyagramı. Daire, yıldız ve içi dolu daireler sırası ile beyaz cüce, nötron yıldızı ve karadelik bileşenleri, + ve x sembolleri ile LTCB ve HTCB sistemleri gösterilmiştir.



Şekil 3. Dejenere çift yıldızlar için $\log \tau_{GR} - \log P$ diyagramı. Daireler, içi boş kareler, içi dolu daireler ve üçgenler sırası ile BC+BC, KD+KD (AMCVn), NY+NY and NY+BC sistemlerini göstermektedir.

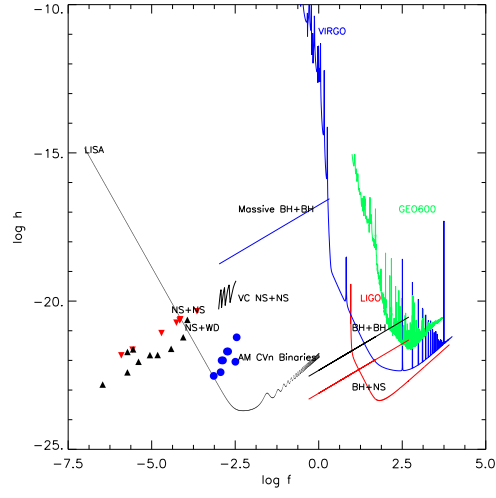
Gravitasyonel dalgaların ölçümü için günümüzde çeşitli projeler (VIRGO, LIGO, LISA vb.) geliştirilmiştir. Gravitasyonel dalgaları yolu ile dönem değişimi ilk kez PSR B1913+16 çift pulsarın gözlemlerinden görülmüştür (Taylor ve Weisberg, 1982). Bileşenlerin kütlesi, dönemi ve uzaklığı bilenen sistemlerin gravitasyonel dalgalarının genliği h parametresi ile temsil edilir. Gözlenmiş olan sistemlerin h değerleri hesaplanarak Şekil 4 te frekansa karşı çizilmiştir. Şekilde ayrıca gravitasyonel dalgalarının ölçümü için geliştirilen projelerde kullanılan gözlem aletlerin sınır değerleri de gösterilmiştir. Buna göre özellikle AM CVn sistemleri başta olmak üzere birçok rölativistik sistemin, özellikle LISA ile, gözlenmesi önümüzdeki yıllarda planlanmaktadır (Köse & Yakut 2010c).

Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK (Pr.No: 109T047), TÜBA ve Ege Üniversitesi Fen Fakültesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- Eggleton, P. P., 1983, ApJ, 268, 368
Köse, O. & Yakut, K., 2010c, baskıda
Landau, L. D. & Lifshitz, E. M., The classical theory of Fields, 1951, Pergamon Press, Oxford.
Milone E. F., 1968, AJ, 73, 708
Skumanich, A. 1972, ApJ, 171, 565
Smith, M. A., 1979, PASP, 91, 737



Şekil 4. $\log h$ - f diagramı. Seçilen bazı rölativistik sistemler ve AM CVn sistemleri farklı gözlem projelerinin aletsel sınır değerleri ile karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Şekilde olası küçük dönemli nötron (NS+NS) ve karadelik çiftleri (BH+BH) gösterilmiştir.

- Taylor J. H., Weisberg J. M., 1982, ApJ, 253, 908
Yakut, K. & Eggleton, P.P., 2008, ApJ, 629, 1055
Yakut K., Kalomeni B., Tout C. A., 2008, mqw..conf
Yakut, K., 2010a, baskıda
Yakut, K., 2010b, baskıda
Yakut, K., 2011, hazırlık aşamasında