



Dönen Karadelikler Etrafındaki Yığılma Diskinin Modellenmesi: Ağır Kütleli X-ışın Çiftleri

Fahrettin KOYUNCU, Orhan DÖNMEZ*

Niğde Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü, Niğde

(Alınış Tarihi: 15.11.2012, Kabul Tarihi: 17.04.2013)

Anahtar Kelimeler

Rölativistik Hidrodinamik
Şok Konisi
Kara Delik
Flip-flop Kararsızlığı
Yüksek Kütleli X-ışın Çifti

Özet:Bu makalede, ağır kütleli X-ışını çiftlerinde bulunan dönen karadelikler etrafındaki disk oluşum mekanizmaları, şok konilerinin ve dalgalarının yapısı, genel rölativistik hidrodinamik denklemlerin yüksek çözünürlüğe sahip nümerik yöntemler ile çözülerek oluşturulmuştur. Oluşan disk ve şok konilerinin yapısının, Mach sayısı, adyabatik indeks ve disk yarıçapı başlangıç şartlarına nasıl bağlı olduğu gösterilmiştir. Farklı fiziksel şartlar farklı disk yapıları oluşturur ve bunlarda karadelikler etrafında farklı fiziksel mekanizmaların oluşmasına neden olurlar. Karadelikler üzerinde oluşan bu şok konileri disk üzerinde ki salınım modlarını hapsederler. Hapsedilen bu salınım modları ise diskte yarı periyodik salınımlara neden olurlar. İşte bu fiziksel olaylar, karadelikler ve onların oluşturduğu ağır kütleli X-ışını çiftlerinin anlaşılmasını sağlarlar.

Modelling of Accretion Disk Around the Rotating Black Holes: High Mass X-ray Binaries

Keywords

Relativistic
Hydrodynamics
ShockCone
Black Hole
Flip-flop Instability
High Mass X-ray Binary

Abstract:In this paper, we present the formation mechanisms of the accretion disk, shock cones and waves on the disk around the rotating black holes in the High Mass X-ray Binaries (HMXBs) solving the general relativistic hydrodynamic equation using the high resolution shock capturing scheme. We show how the disk and shock cones change depending on the initial conditions, Mach number, adiabatic index and the disk radius. Different physical conditions create different disk structures and these structures cause the varying physical mechanisms around the black holes. The shock cones around the black holes trap the oscillation modes. These trapped oscillation modes cause the quasi-periodic oscillation on the accretion disk. The different formations of disk help us to understand the properties of the black holes and mechanisms in the high mass X-ray binaries.

1. Giriş

Ağır kütleli X-ışın çift sistemleri, O veya B türünden bir yıldızın yörüngesinde dolanan nötron yıldızı (pulsar) veya bir kara delik içerir. Bu sistemlerdeki X-ışın yayılımı, yıldızdan kopan maddelerin yoğun nesnelere etrafında yığılması ile oluşur. Dolayısıyla bu sistemlerin yaydığı ışınım miktarı tamamen karadelik veya nötron yıldızı etrafında biriken madde miktarı ile orantılıdır.

Ağır kütleli X-ışın çift sistemleri iki grup altında toplanabilir. Birinci grup Be tipi yıldız içeren (Be/X-

ışın çifti) çiftli sistemler, ikinci grup ise Süper dev (SD/X-ışın çifti) yıldız içeren sistemlerdir (van Paradijs 1983).

Bilinen Ağır kütleli X-ışın çift sistemlerinin çoğunluğunu, Be türü yıldız ile nötron yıldızının oluşturduğu Be/X-ışın çiftleri oluşturmaktadır. Bu sistemlerde nötron yıldızı genellikle Be yıldızı etrafında büyük yarıçaplı eliptik yörüngede dolanırlar (van den Heuvel ve Rappaport 1987). Be yıldızı, yıldız rüzgarıyla nötron yıldızının yörünge düzlemi ile farklı bir düzlem üzerinde sınırlı bir disk oluşturur. Nötron yıldızı Be yıldız diski içinden geçtiği

zaman, kısa sürede bol miktarda gaz almaya devam eder. Gaz nötron yıldızı üzerine düştüğünde, parlak X-ışınları oluşur (Bhattacharya D. ve van den Heuvel 1991) (Apparo K.M.V., 1994).

İkinci grup Ağır kütleli X-ışın çiftlerinde ise yoğun nesne erken tayf türü bir süper dev etrafında (SD/X-ışın çifti) dolanmaktadır. Bu sistemlerde ki X-ışını yayını, süper devin yıldız rüzgarları ile kaybettiği maddenin, yoğun nesne tarafından yakalanarak üzerine düşmesi veya RocheLobe taşması sonucunda üretilir (Liu Q.Z. vd., 2000).

1983 yılında keşfedilmiş X-ışın çiftlerinin sayısı 30 kadardı (van Paradijs, 1983). 1995 yılında bu sayı 69'a kadar yükseldi (van Paradijs 1995). X-ışın uyduları sayesinde bu sistemlerin sayısı günümüze kadar önemli bir ölçüde artış göstermiştir (ağır kütleli X-ışın çiftleri katalogu için bakınız Liu Q.Z. vd., 2000) . Bilinen en eski ve en ünlü Ağır kütleli X-ışın çifti Cyg X-1 dir (Bowyer S. vd, 1965). Bu sistemi özel kılan yanı ise, süper dev yıldız eşlik eden nesnenin bir karadelik olmasıdır. Bu sistemdeki kara deliğin kütlesi $M = 14.8 \pm 1.0 M_{\odot}$ ve eşlik eden yıldızın kütlesi ise $M = 19.2 \pm 1.9 M_{\odot}$ (Jerome A. O. vd, 2011) . Diğeri ise, bir nötron yıldız ile süper dev bir yıldızın oluşturduğu Vela X-1 kaynağıdır. Bu sistemdeki nötron yıldızının X-ışını yayını süper dev yoldaşından, yıldız rüzgarıyla kopan maddeleri yakalaması ile meydana gelmektedir ve nötron yıldızının kütlesi yaklaşık $M = 1.88 \pm 0.13 M_{\odot}$ (Quaintrell H. vd, 2003).

Bu çalışmada, Roche-Lobe'nu doldurmuş yıldızdan, yıldız rüzgarları sonucu kopmuş maddelerin dönen karadelikler etrafında oluşturduğu birikim diski üzerindeki şok konilerinin ve dalgalarının yapısı incelenmiştir. Şok dalgalarının ve konilerinin yapılarının incelenmesi için Genel Rölativistik Hidrodinamik (GRH) Denklemler yüksek çözünürlüğe sahip sayısal yöntemler kullanılarak paralel bilgisayarlar yardımı ile çözülmüştür. Bu mekanizmaların sayısal olarak çözülmesi için gerekli olan başlangıç ve sınır şartları tanımlanmıştır.

2. Ekvator Düzleminde Genel Rölativistik Hidrodinamik Denklemler

Bu bölümde, Bondi-Hoyle tipi yığılma durumdaki disk oluşumunun ekvator düzleminde modellenmesi için ilk önce Genel Rölativistik Hidrodinamik Denklemler ve kaynak ekvator düzleminde tanımlanmıştır. Bu denklemlerin sayısal çözümü yüksek çözünürlüğe sahip sayısal yöntemler kullanılarak yapılmış, karadelik etrafında diskin modellenmesinde kullanılan program, dönen ve dönmeyen karadelikler etrafındaki disk yapısını modellemek için hazır hale getirilmiştir (Dönmez O., 2004), (Dönmez O.vd, 2011).

Karadelikler etrafındaki yığılma disklerinin yapısını modellemek için kullanılan Genel Rölativistik Hidrodinamik Denklemler ekvator düzlemi üzerinde tanımlanıp, karadelinin konum-zamanını belirleyen matris verilmiştir. Genel Rölativistik Hidrodinamik Denklemleri tanımlayabilmek için ideal gaz durumundaki stres-enerji tensörü,

$$T^{\mu\nu} = h\rho u^{\mu}u^{\nu} + P g^{\mu\nu} \quad (1.1)$$

olarak verilir. Burada u^{μ} akışkanın dört hızı, h, ρ ve P sırasıyla; öz entalpi, serbest kütle yoğunluğu ve basınç olarak verilmiştir. Buradaki niceliklerin hepsi eylemli referans sistemine göre ölçülmüştür ve $g^{\mu\nu}$ ise uzay-zamanı tanımlayan metriktir. Uzay-zamanı tanımlayan Kerr metriği Boyer-Lindquist (t, r, θ, φ) koordinatlarında,

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2Mr}{\Sigma^2}\right) dt^2 - \frac{B}{\Sigma^2} dt d\varphi + \frac{\Sigma^2}{\Delta} dr^2 + \frac{A}{\Sigma^2} \sin^2\theta d\varphi^2 + \Sigma^2 d\theta^2, \quad (1.2)$$

şekindedir. Burada,

$$\begin{aligned} \Sigma^2 &= r^2 + a^2 \cos^2\theta \\ \Delta &= r^2 - 2Mr + a^2 \\ A &= (r^2 + a^2)^2 - a^2 \Delta \sin^2\theta \\ B &= 4Mar \sin^2\theta, \end{aligned} \quad (1.3)$$

a karadelinin spini ve M ise karadelinin kütlesidir. Verilen metrikte lapse fonksiyonu $\alpha = (\Sigma^2 \Delta / A)^{1/2}$ ve shift vektörü $\beta^i = (0, 0, -2Mar/A)$ şeklindedir. Genel Rölativistik Hidrodinamik Denklemler kullanarak karadelinin etrafındaki kütle birikiminin özelliğinin ortaya çıkarabilmesi için stres enerji tensörü ve akım yoğunluğunun oluşturduğu kovaryant formdaki hidrodinamik denklemler korunum formunda yazıldığında,

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}^i}{\partial q^i} = \mathbf{S} \quad (1.4)$$

halini alır. Burada \mathbf{U} korunum parametresi, \mathbf{F}^i ve \mathbf{S} ise kaynak vektörlerini tanımlar. Denklem 1.4 genelleştirilmiş koordinat q^i 'e (i herhangi bir yöndeki koordinatı belirler) bağlı olarak verilmiştir. Biz burada, dönen karadelikler etrafındaki disk oluşumunu bulabilmek için, GRH denklemleri küresel koordinatlarda ve ekvator düzleminde tanımlarsak,

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}^r}{\partial r} + \frac{\partial \mathbf{F}^{\theta}}{\partial \theta} = \mathbf{S}, \quad (1.5)$$

şeklinde yazılır.

Bu makalede tanımlanan denklemlerin detaylı anlatımı (O. Dönmez, 2004) (Dönmez O, vd, 2011)'de verilmiştir.

3. Başlangıç ve Sınır Şartları

Bu makalede oluşturulan nümerik simülasyonlar ekvator düzleminde ($\theta = \pi/2$) elde edilmiştir. Gazın sahip olduğu açısız ve radyal hız,

$$\begin{aligned} V^r &= \sqrt{\gamma^{rr}} V_\infty \cos(\varphi) \\ V^\varphi &= -\sqrt{\gamma^{\varphi\varphi}} V_\infty \sin(\varphi) \end{aligned} \quad (1.10)$$

ile verilmektedir. Karadelik etrafındaki gazın davranışını inceleyebilmemiz için sistemin durum denklemini bilmemiz gerekir. Durum denklemini gazın basıncının iç enerji ve yoğunluğa bağımlılığını verirken, aynı zamanda gazın sıkıştırabilirliğinde tanımlar. İdeal gaz durumunda durum denklemini,

$$P = (\Gamma - 1)\rho\varepsilon, \quad (1.11)$$

ile verilir. Burada Γ gazın sıkıştırabilirliğini tanımlayan adyabatik indeks ve ε ise iç enerjidir. Hesaplama bölgesi için çözünürlük değerleri ($N_r \times N_\varphi$), $N_r = 2048$ ve $N_\varphi = 256$ şeklindedir. Diskin yarıçapları $R = 24M, 80M$ ve $200M$ (burada M kara deliğin kütesidir) olurken, açısız büyüklük sıfır (0) dan 2π 'ye kadardır. Bütün hesaplamalarda ses hızı $C_{s,\infty} = 0.1$ ve karadelinin dönme parametresi $a = 0.9$ olarak alınmıştır. Nümerik simülasyonlar, karadelik etrafındaki boş uzaya Lagrange noktasından madde enjekte edilerek gerçekleştirilmiştir. Enjekte edilen madde buradaki yüksek çekim kuvvetinin etkisiyle karadelige doğru düşürülmüş ve sahip olduğu parametrelere bağlı olarak, karadelik etrafında

değişik şekillerde yığılma diski ve disk üzerinde şok konileri oluşturulmuştur. Modellemelerde, karadelige en yakın ve en uzak olan radyal noktalarda maddeyi hesaplama bölgesinden dışarı atan sınır şartı kullanılırken, açısız yönde periyodik sınır şartı kullanılmıştır.

4. Nümerik Sonuçlar ve Tartışma

Karadelikler doğrudan gözlenemedikleri için, onların spin ve kütle gibi tanımlayıcı parametrelerinin ortaya çıkarılması karadeliklerin etrafındaki disklerin yapısının belirlenmesi ile mümkündür. Diskin yapısı da karadelinin dönme parametresine, gazın adyabatik indeksine, sesin hızına ve kara delige düşen gazın Mach sayısına bağlıdır. Diskler üzerinde oluşan şok dalgaları, diskin açısız momentumunu kaybetmesine neden olabileceği gibi aynı zamanda diskin sahip olduğu salınım modlarının hapsolmesine ve bunların genliğinin artmasına neden olurlar. Bu yüzden diskin dinamik yapısının anlaşılması diskin saldırdığı ışınımın özelliklerinin anlaşılması ile mümkündür.

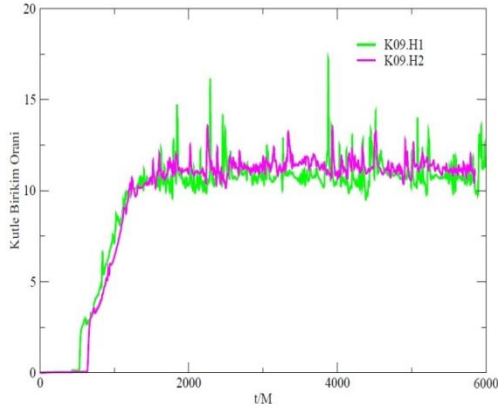
Biz burada karadelige doğru düşen maddenin oluşturduğu diskin dinamik durumu modelledik ve aynı zamanda diskin üzerinde oluşan şok dalgalarının özelliklerini ortaya çıkardık. Bu makaledeki modellemelerde Çizelge 1'deki başlangıç şartları kullanıldı. Dönme parametresi $a = 0.9$ olan karadelik etrafındaki diskin yapısı, dış sınırdan gönderilen gazın ses hızı $C_{s,\infty} = 0.1$ olduğu durumda farklı adyabatik indeks, Mach sayısı ve hesaplama bölgeleri için modelledik.

Tablo 1. Sayısal olarak modellenen diskin başlangıç değerleri. Soldan sağa: Model ismi, ses hızı (C_s), karadelinin dönme parametresi (a), adyabatik indeks (Γ), diskin yarıçapı ($R(M)$), düşen gazın radyal asimptotik hızı ($v_{\infty,r}$), düşen gazın açısız hızı ($v_{\infty,\theta}$), şok konisinin merkezi SM (Rad), diskin durumu, şok konisinin açılma açısı θ_{ac} (rad)

Model	C_s	a	Γ	$R(M)$	$(v_{\infty,r})$	$(v_{\infty,\theta})$	SM (Rad)	D.Durumu	θ_{ac} (rad)
K09.H1	0.1	0.9	1.1	200	0.001	1	----	Kararsız	----
K09.H2	0.1	0.9	1.2	200	0.001	1	----	Kararsız	----
K09.H3	0.1	0.9	4/3	24	0.4	0.4	1.814	Kararsız	1.044
K09.H4	0.1	0.9	4/3	24	0.1	0.1	1.570	Kararsız	0.785
K09.H5	0.1	0.9	4/3	24	0.4	0.4	1.918	Kararsız	0.697
K09.H6	0.1	0.9	4/3	80	0.01	1	0.174	Kararsız	0.819
K09.H7	0.1	0.9	4/3	80	0.01	0.1	1.046	Kararsız	0.959
K09.H8	0.1	0.9	4/3	200	0.01	1	0.383	Kararsız	0.697
K09.H9	0.1	0.9	4/3	200	0.001	1	0.471	Kararsız	0.837
K09.H10	0.1	0.9	5/3	200	0.001	1	0.802	Kararlı	1.046

Bütün disk oluşum mekanizmalarında veya Bondi-Hoyle birikiminde, diskin dinamik yapısını ve oluşan şok dalgalarının özelliğini belirleyen en önemli parametreler gazın adyabatik indeksi ve Mach sayısıdır. Yıldızdan kopan maddenin karadelige doğru düşmesi durumunda kütle birikim oranının

farklı adyabatik indeks durumunda zamana göre değişimi $r=8M$ 'de hesaplanmış ve bu durum Şekil 1'de gösterilmiştir.

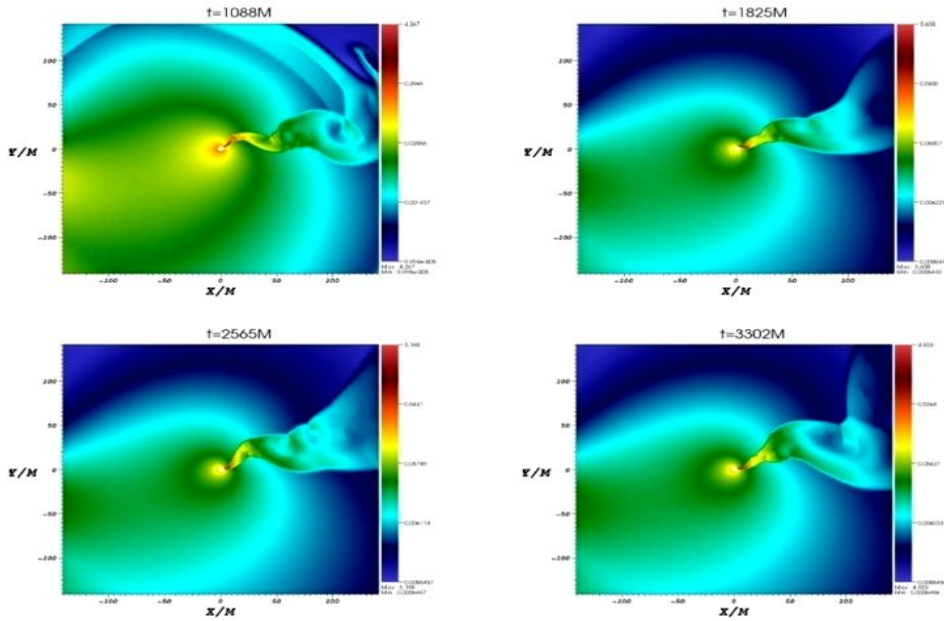


Şekil 1.K09.H1 ve K09.H2 iki farklı model için verilmiş başlangıç koşullarında, dönme parametresi $a = 0.9$ olan karadelik üzerindeki kütle birikimin zamanla değişimi farklı adyabatik indeksin kütle birikimine etkisi

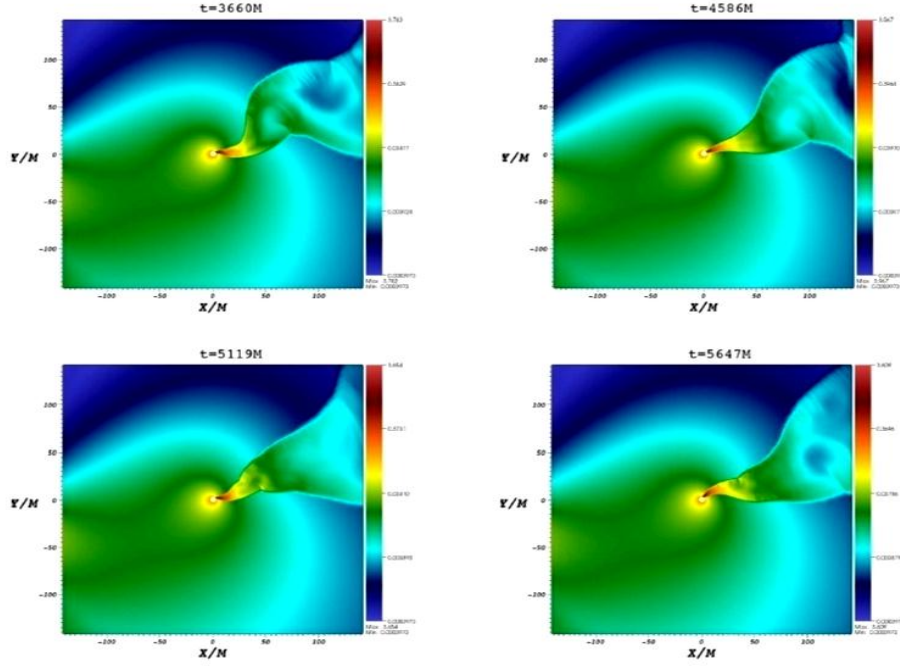
Her iki model için (K09.H1 ve K09.H2) disk yaklaşık $t=1200 M$ civarında kararlı duruma ulaşmış ve belli bir değer etrafında salınım yapmaktadır. Bu salınımın nedeni ise oluşan şok konisinin belli bir eksen etrafında oluşturduğu düzensiz flip-flop

salınımlarıdır. Çizelge 1’de görüldüğü gibi K09.H1 modeli için adyabatik indeks değeri $\Gamma=1.1$ iken K09.H2 modeli için $\Gamma=1.2$ dir. Adyabatik indeksin artırılması ile kütle birikim oranının azda olsa azaldığı Şekil 1’de görülmektedir.

K09.H1 ve K09.H2 modellerindeki başlangıç şartları için diskin dinamik yapısının zamanla değişimi Şekil 2 ve Şekil 3’te verilmiştir. Buradan da görüldüğü gibi, hesaplama bölgesine dış sınırdan gönderilen madde karadelğin kütle çekim kuvveti tarafında yakalanmış ve karadelğin arkasında bir şok konisi oluşmuştur. Oluşan şok konisi düzenli salınımlar yapan kararsızlık göstermektedir. Diskin dış sınırı $R=200M$ ’de olduğundan, sınırdan gelebilecek salınımlar şok konisinin dinamik yapısını etkilememektedir. Şok konisinin oluşumu diskin salınım modlarını hapsediği gibi aynı zamanda salınan şok konisi de yarı-periyodik salınımlar oluşturmaktadır. Oluşan şok konilerinin flip-flop salınımı aynı zamanda merkezdeki karadelğin dönme etkisini zamanla artırıp azaltacaktır.



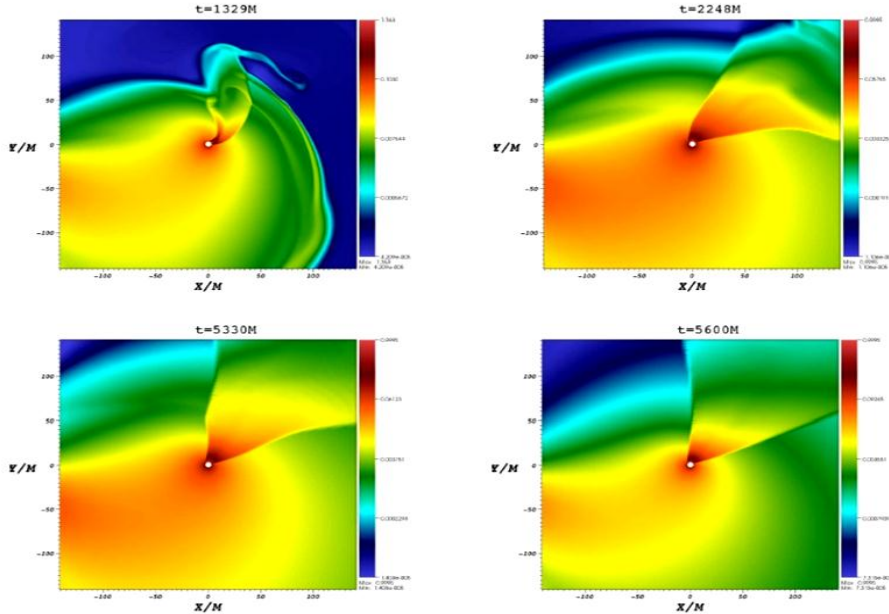
Şekil 2.K09.H1 modeli için verilmiş başlangıç koşullarında, dönme parametresi $a = 0.9$ olan karadelik üzerindeki yığılma diski ve diskin farklı zamanlarda anlık görüntüleri verilmiştir. Disk açık bir şekilde periyodik salınımlar yapmaktadır



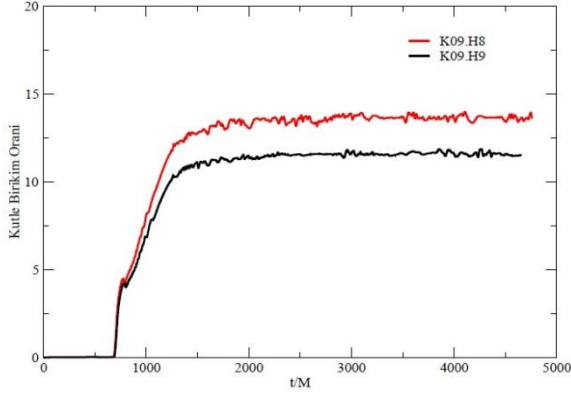
Şekil 3.K09.H2 modeli için verilmiş başlangıç koşullarında, dönme parametresi $a = 0.9$ olan karadelik üzerindeki yığılma diski ve diskin farklı zamanlarda anlık görüntüleri verilmiştir. Disk açık bir şekilde periyodik salınımlar yapmaktadır

Küçük adyabatik indekse sahip olan maddenin oluşturduğu diskin daha kararsız olduğu, flip-flop davranışı gösterdiğini daha önceki modellerde vurgulamıştık. Şekil 4'te ise adyabatik indeks değeri $\Gamma=5/3$ durumunda K09.H10 için diskin zamanla değişimi gösterilmiştir. Bu modelde oluşan şok konisinin flip-flop türü salınımlar yapmadığı görülmüş ve aynı zamanda kütle birikim oranının daha az olduğu bulunmuştur. Adyabatik indeks

büyüdükçe maddenin karadelik tarafından yakalanması daha zor olduğundan (madde bu durumda daha serbest hareket edebilir), kütle birikim oranı azalmıştır. Bu sonuç, teori ve gözlem ile uyum içindedir.

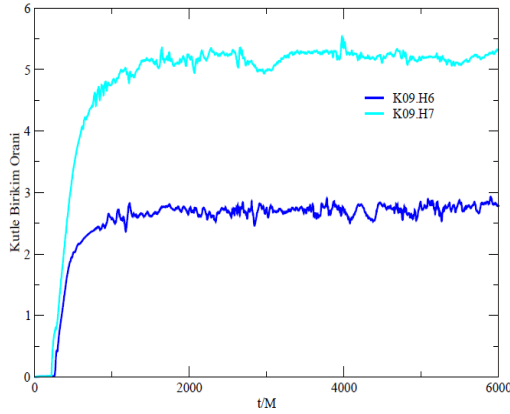


Şekil 4.K09.H10 modeli için verilmiş başlangıç koşullarında, dönme parametresi $a = 0.9$ olan karadelik üzerindeki yığılma diski ve diskin farklı zamanlarda anlık görüntüleri verilmiştir. Disk çok ufak salınımlar ile kararlı bir yapı sergilemektedir



Şekil 5. K09.H8 ve K09.H9 iki farklı model için verilmiş başlangıç koşullarında, dönme parametresi $a = 0.9$ olan karadelik üzerindeki kütle birikimin zamanla değişiminin farklı radyal hızıya sahip olan gazın madde birikimine etkisi

Karadelikler etrafındaki disk oluşum mekanizmalarını etkileyen parametrelerden bir tanesi de gazın Mach sayısıdır. Mach sayısı diskin yapısında değişime neden olabileceği gibi, aynı zamanda kütle birikim oranını da etkiler. Şekil 5'te daha büyük Mach sayısına sahip olan gazın daha çok birikime neden olduğu açıkça görülmektedir. Çünkü büyük Mach sayısına sahip gaz büyük radyal hızıya sahip olduğundan, madde doğrudan karadeliğe düşecek böylece birikim fazla olacaktır.



Şekil 6. K09.H6 ve K09.H7 iki farklı model için verilmiş başlangıç koşullarında, dönme parametresi $a = 0.9$ olan karadelik üzerindeki kütle birikimin zamanla değişimi ve gazın açılma hızının madde birikimine etkisi

Gazın açılma hızının kütle birikimine etkisi, Şekil 6'da K09.H6 ve K09.H7 modellerinin karşılaştırılması yapılarak gösterilmiştir. Açılma hızı büyük olan madde daha büyük bir merkezci kuvvete sahip olur. Merkezci kuvvet kütle çekimsel kuvvete karşı koyacağından, karadelik etrafında biriken maddenin karadeliğin çekim kuvvetinden kurtulma ihtimali artar. Dolayısıyla karadelik etrafında daha az madde birikecektir.

5. Sonuç

Bu makalede, ağır kütleli X-ışın çiftlerindeki karadeliğin etrafındaki birikim disklerini modellemek için GRH denklemleri iki boyutta ekvator düzleminde sayısal yöntemler kullanılarak çözülmüştür. Yapılan modellemeler sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

Elde edilen nümerik simülasyon sonuçları bize karadelik etrafındaki kütle birikiminin gazın sahip olduğu parametrelerle değiştiğini (adyabatik indeks, gazın açılma ve radyal hızı) göstermiştir. Adyabatik indeksin büyümesi durumunda gaz daha serbest hareket ettiğinden, karadeliğin çekim etkisinden kurtulur ve daha az bir birikime neden olur. Adyabatik indeksin küçük olması ise kütle birikimini artırırken, diskin daha kararsız bir hale getirir ve flip-flop türü salınımlar yapmasına yol açar. Aynı zamanda, gazın sahip olduğu radyal ve açılma hızlarının değiştirilmesi ise doğrudan karadelik etrafındaki kütle birikim oranını etkilemiştir. Bunun sonucu olarak, karadelik etrafındaki biriken kütle miktarının değişmesi onun yayınladığı X-ışın miktarını da değiştirecektir. Bu çalışmada yapmış olduğumuz nümerik simülasyonlar, gözlemsel olarak elde edilmiş verilerin açıklanması için gerekli olan fiziksel mekanizmaları tanımlayabilir.

Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan hesaplama kaynakları Ulusal Yüksek Başarımlı Hesaplama Merkezi'nin (UYBHM), 10022007 numaralı desteğiyle sağlanmıştır. Bu çalışma TÜBİTAK 109T519 no'lu Hızlı Destek Projesi tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

Van Paradijs, J., 1983. Accretion Driven Stellar X-ray Sources. Cambridge University Press, 189s, Cambridge.

van den Heuvel, E.P.J., Rappaport, S.A., 1987. Physics of Be Stars. Cambridge University Press. 291s, Cambridge.

Bhattacharya D., van den Heuvel E.P.J., 1991. Formation and Evolution of Binary and Millisecond Radio Pulsars. Physics Report, 203, 1-124.

Apparao, K.M.V., 1994. X-Ray Emission from Be Star/X-Ray Binaries. Space Science Reviews, 255-329.

Liu, Q.Z., van Paradijs, J. & van den Heuvel, E. P. J. 2000. A Catalogue of High-Mass X-ray Binaries. Astronomy and Astrophysics Supplement Series, 147, 25-49.

van Paradijs, J., 1995. X-ray binaries. Cambridge University Press, 536s, Cambridge.

Bowyer, S., Byram, E. T., Chubb, T. A., Friedman, H. 1965. Cosmic X-ray Sources. *Science*, 147, 394-398.

Jerome, A. O., Jeffrey, E., McClintock, J. P., Aufdenberg, R. A., Remillard, M. J., Reid, R. N., Lijun G. 2011. The Mass of the Black Hole in Cygnus X-1. *The Astrophysical Journal*, 742-752.

Quaintrell, H., Norton, A. J., Ash, T. D. C., Roche, P., Willems, B., Bedding, T. R., Baldry, I. K., Fender R. P. 2003. The Mass of the Neutron Star in Vela X-1 and Tidally Induced Non-radial Oscillations in GP Vel. *Astronomy and Astrophysics*, 401, 313-323.

Dönmez, O. 2004. Code Development of Three-Dimensional General Relativistic Hydrodynamics with AMR (Adaptive-Mesh Refinement) and Results from Special and General Relativistic Hydrodynamics. *Astrophysics and Space Science*, 293, 323-354.

Dönmez, O., Zanotti, O., Rezzolla, L. 2011. On the Development of Quasi-periodic Oscillations in Bondi-Hoyle Accretion Flows. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 412, 1659-1668.