

GÖKADA MERKEZİNDEKİ GENÇ YILDIZ DİSKLERİ İÇİN EĞRİLİKLİ DİSK OLUŞUM SENARYOSU

Ayşe ULUBAY-SIDDIKİ¹, Ortwin GERHARD¹ ve Magda
ARNABOLDI²

Özet

Gökadamız Samanyolu'nun merkezi, süperkütleli karadeliğe yakınlıkları yüzünden oluşumları açıklanamayan bir grup genç yıldız barındırmaktadır. Bu genç yıldızlardan bir kısmına dair açıklanamayan diğer bir özellik ise, bu yıldızların birbirine neredeyse dik iki diskin üzerinde bulunmalarıdır. Bu çalışmada, bahsi geçen yıldızların yörüngelerinin bir eğrilikli disk (warped disk) senaryosu ile açıklanıp açıklanamayacağını araştırdık. Diskleri, karadeliği çevreleyen, içiçe geçmiş, dairesel, ve çekimsel olarak birbirleri ile ve SgA* civarında bulunan yaşlı yıldız kümesi ile etkileşen halkalar olarak ele aldık ve tüm halkaların aynı frekansta presesyon hareketi yaptığı denge konumlarını hesapladık. Disklerin sahip oldukları çıkarsanan toplam kütle ve gözlemlenen radyal genişliklerini kullanarak belirli presesyon frekansları için aralarındaki açının alabileceği değerleri hesapladık. Daha sonra diskleri oluşturduğunu varsaydığımız halkaların hareket denklemlerini integre ederek disklerin kararlılığını inceledik. Gözlemlerle uyuşan parametreler için kararlı ve yarı-kararlı denge durumlarının bulunabileceğini gösterdik.

Anahtar Kelimeler: gökada merkezi, eğrilikli diskler

Abstract

The center of our galaxy hosts a group of young stars. The origin of these stars is a puzzle because of their proximity to the supermassive black hole. For a fraction of these young stars, youth is not the only unexplained property, but also is their orbital distribution. These stars are observed to lie on two

mutually inclined disks. In this study, we develop a warp origin scenario for these disks. We model a warped disk as a collection of concentric circular rings which are inclined with respect to each other. We consider the torques as induced by the disk self-gravity, and by the central old stellar cluster. We evaluate the warped equilibria where all the rings precess with a common frequency. We then perform time integration of the equations of motion, and show that Galactic Center stellar disks are consistent with having a stable/quasi-stable warped disk origin.

Keywords: *Galactic Center, warped disks*

¹ Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Giessenbachstrasse, D-85748, Garching/Almanya

² ESO, Karl-Schwarzschildstrasse 2, D-85748, Garching/Almanya

1. Giriş

Gökadamız Samanyolu'nun merkezi, bize yaklaşık 8 parsek uzaklığı ile en yakın gökada merkezidir. Bu yakınlık nedeni ile bizlere, diğer gökada merkezlerinde gerçekleşmesi de olası pek çok astrofiziksel süreç hakkında değerli bilgiler sağlamaktadır. Gökada merkezinin çok yakın komşulugunda genç yıldızların var olduğu son yıllarda yapılan gözlemlerle ortaya konmuştur (Genzel ve diğ. 2003, Paumard ve diğ., 2006). Halbuki teorik beklentiler gökada merkezindeki yaklaşık $4 \times 10^6 M_{\text{güneş}}$ kütleli karadeliğin, yakın civarında yıldız oluşumuna olanak sağlamayacağı yönündedir.

SgA* a yaklaşık 0.04-0.4pc uzaklıkta bulunan genç yıldızlar O/WR tipi yıldızlar olup yörüngeleri eş yönlü değildir. Şu ana kadar gözlenen 90 yıldızdan 60'ı gökyüzü düzleminde saat yönünde (SY) hareket eden bir disk üzerinde oturmaktadır (Levin ve Beloborodov, 2003, Genzel ve diğ.,2003). Geri kalan yıldızlardan 18'inin gökyüzü düzleminde saat yönünün tersinde (SYT) hareket eden diğer bir disk oluşturduğu gözlenmiştir (Genzel ve diğ.,2003, Paumard ve diğ.,2003, Bartko ve diğ.,2008). Bu iki disk arasında 90 dereceye varan bir eğim bulunmaktadır. Süper kütleli karadeliğin bu kadar yakın

komşuluğunda o yıldızların nasıl oluştuğu sorusu halen cevap beklerken, oluşturdukları disklerin arasındaki bu yüksek eğim açısı da bir diğer bilinmeyen durumundadır.

Gerhard (2001) yaptığı çalışmada genç yıldızların gökada merkezinde oluşmadığı, merkeze bir kaç 10 pc uzaklıkta bir yıldız kümesinde oluşarak dinamik sürtünme ile merkeze sürüklendiği yönünde bir senaryo ortaya attı. Bu senaryoyu takip eden sayısal benzetimler, senaryonun geçerli olabilmesi için gereken bulut yoğunluklarının gökada merkezinde gözlenen molekül bulutlarının yoğunluğundan çok daha fazla olduğunu gösterdi.

Genç yıldızların varlığını açıklamaya çalışan diğer bir senaryoya göre ise, düşük açısal momentumlu bir molekül bulutu SgA* tarafından yakalanır, ve bir toplanma diski oluşturur. Yıldızlar bu disk üzerinde, yani şu anda gözlendikleri konumda oluşurlar. Bu senaryoyu temel alan pek çok sayısal benzetim de yapılmış ancak yine doyurucu sonuçlar elde edilememiştir. İlk olarak bu benzetimlerin çoğu disklerin gözlendiği uzaklıkta zaten çekimsel kararsız olan toplanma disk(ler)i ile başlatıldı ve evrimleri incelendi (Nayakshin ve diğ., 2006). Doğal olarak çekimsel kararsız olan toplanma diski üzerinde yıldızlar oluştu. İkinci olarak ise, başlangıç koşulları ne olursa olsun herhangi bir süreç ile ikinci bir diskin oluşması gözlenemedi (Cuadra ve diğ., 2008).

Bu çalışmada, bahsi geçen O/WR yıldızlarının standart düzlemsel bir toplanma diskinden değil, yıldız oluşumu başlamadan önce eğrilik(warp) kazanmış öz çekimsel bir diskten oluşmuş olabileceklerini gösteriyoruz. 2. bölümde disklerin ışınım basıncına maruz kaldıklarında eğrilik kazanabilecekleri modeli özetliyoruz. 3. bölümde, varsayılan diskin sahip olacağı özellikleri gözlemsel veriler ışığında belirlemeye çalışıyoruz. 4. bölümde eğrikli disk modelimizi tanıtıyor ve son olarak sonuçlarımızı tartışıyoruz.

2: Işınım Basıncı ve Nükleer Disklerde Eğrilik

Optikçe kalın eğrilikli bir diskin yüzeyi merkezi bir kaynak, veya diskin iç kısımları tarafından aydınlatıldığında, diskin yüzeyinden dik açıyla yansıtılan fotonlar disk üzerine eksensel simetrik olmayan bir basınç uygular. Bu basınç disk elementlerinin eğriliklerinin artmasına neden olur (Pettersson, 1977). Başlangıçta tamamen düzlemsel olan bir disk de ışınım basıncı ile eğrilik kazanmaya karşı kararsızdır (Pringle, 1996). Bu kararsızlığın ortaya çıkabilmesi için gerekli olan şart, eğriliğin büyüyeceği zaman ölçeğinin (t_e), diskteki eğriliği ortadan kaldırmaya çalışan dikey viskozite zaman ölçeğinden (t_v) küçük olması ile aşağıdaki şekilde ifade edilir (Pringle, 1997):

$$\frac{12 \pi \Sigma r^3 \Omega c}{L} \leq \frac{2 r^2}{v_2} \quad (1)$$

Burada Σ , merkezden r uzaklıktaki yüzey yoğunluğu, Ω açısal hız, c ışık hızı, L merkezdeki kaynağın ışıması ve v_2 dikey viskozite katsayısıdır.

3: Yıldız Oluşumunu Gerçekleştiren Diskin Özellikleri

Bir diskin üzerinde yıldız oluşumunun gerçekleşip gerçekleşmeyeceği Toomre sayısı Q ile belirlenir. Toomre sayısı (Toomre, 1964)

$$Q = \frac{c_s \Omega}{\pi G \Sigma} \approx \frac{\sqrt{T} \Omega}{\pi G \Sigma} \quad (2)$$

ile verilir ve $Q > 1$ durumu diskin yıldız oluşumuna kararlı olduğu duruma, $Q < 1$ ise diskin yıldız oluşumuna olanak sağlayacağı duruma karşılık gelir. Burada c_s ortamdaki ses hızı, T ise diskin sıcaklığıdır. $Q < 1$ olduğu durumda yıldız oluşumunun gerçekleşmesi için diskin aynı zamanda etkin bir şekilde soğuması gerekir. Bu süreç

$$t_s = \frac{\beta}{\Omega} \quad (3)$$

kadar bir süre alır. Buradaki β soğuma katsayısıdır ve 3-13 arasında değerler alabilmektedir.

SgrA* etrafındaki yıldızların bir moleküler disk üzerinde oluştuğunu kabul edersek bugünkü gözlemler sayesinde o moleküler diske ait bazı bilgilere ulaşabiliriz. Şu ana kadarki gözlemler, SY diskin üzerinde 60, SYT diskin üzerinde ise 18 yıldızın bulunduğunu göstermektedir (Bartko ve diğ., 2008). Bu sayılar yıldızları oluşturduğu varsayılan diske ait başlangıç kütle fonksiyonuna, ($\xi(M)=\xi_0 M^\alpha$), aşağıdaki şekilde bağlıdır:

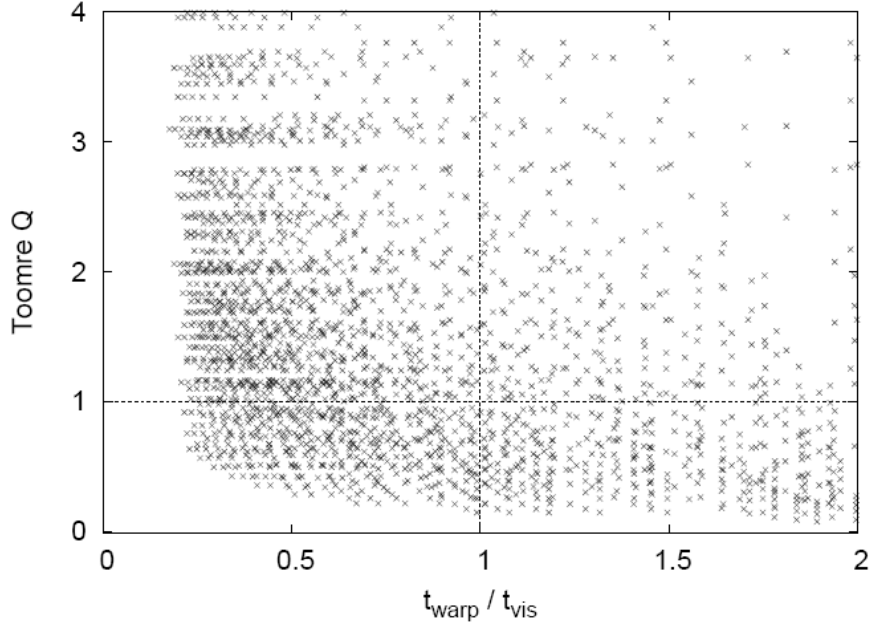
$$N_* = \int_{M_1}^{M_2} \xi(M) dM. \quad (4)$$

Yapılan gözlemler α katsayısının değerini yaklaşık -0.85 olarak belirlemiştir (Paumard ve diğ. 2006). Bunu kullanarak ξ_0 sabitini belirlenebilir, ve buradan da diskin toplam kütlesi aşağıdaki şekilde hesaplanır

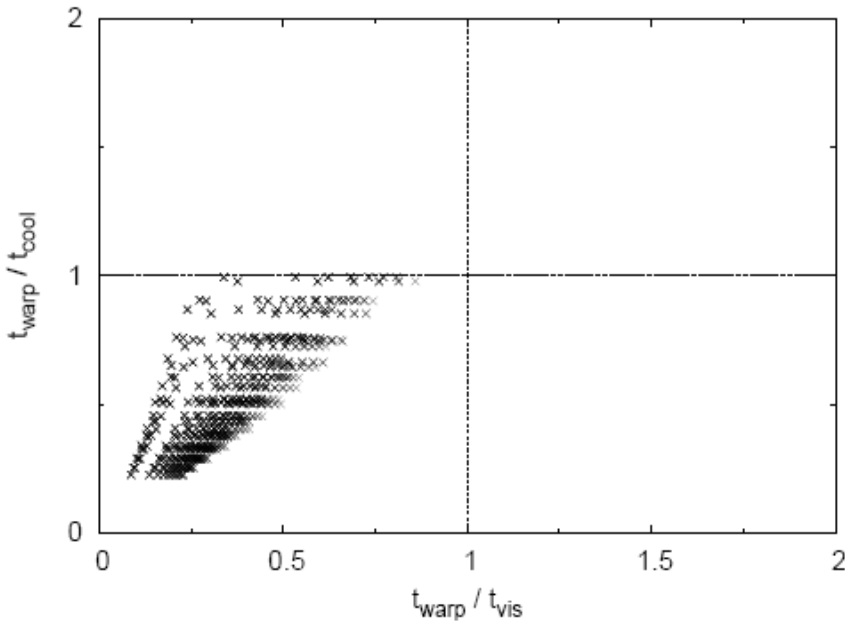
$$M_* = \int_{M_1}^{M_2} M \xi(M) dM. \quad (5)$$

Alt kütle limiti olarak $1 M_{\text{güneş}}$, üst kütle limiti olarak $120 M_{\text{güneş}}$ alındığında toplam kütle yaklaşık $5000 M_{\text{güneş}}$ olarak buluruz. Bu kütle, yıldızları oluşturduğumuz diskin toplam kütesinin belirli bir kısmını oluşturur. Diskin yıldızlar oluşmadan önceki toplam moleküler kütesini belirleyebilmek için yıldız oluşturma verimliliği (ϵ_{SF}) hakkında bir tahminde bulunmalıyız. ϵ_{SF} 'ın 1'den 100'e kadar alacağı değerler için toplam kütle yüzey yoğunluğuna dönüştürebilir ve bu yüzey yoğunluğunun Toomre Q değerine ne şekilde etkidiğine bakabiliriz. $Q>1$ olan diskler için aynı zamanda $t_e < t_v$, ve $t_e < t_s$ eşitsizlikleri sağlandığında oluşan disk yıldız oluşturmaya vakit bulamadan eğrilik kazanacaktır. Merkezde bulunan yaşlı yıldız kümesinin etkisi altında (bölüm 4e bakınız) bu eğriliğin değeri artacak ve disk bu denge durumuna evrimine devam edecektir. SgrA* parametreleri göz önüne alındığında bu koşulların sağlanabileceği değerler bulunduğunu şekil 1 ve 2 de gösteriyoruz. Şekil 1de sol üst köşedeki alan bizim için önemli olurken, şekil 2de

bu parametre aralığında buluna ve $t_e < t_s$ koşulunu da sağlayan disk çözümleri olduğunu görüyoruz.



Şekil 1: SgA^* etrafındaki oluşan disk için Toomre parametresine karşılık eğrilik kazanma zamanı. Bu şekilde disk parameterleri r ; $0.01-1$ pc, T ; $50-500$ K, L/L_{Edd} ; $10^{-5}-1$ aralığında değiştirilmiştir. Karadelinin kütlesi ise $4 \times 10^6 M_{güneş}$ olarak kabul edilmiştir.



Şekil 2: $Q > 1$ ve $t_e < t_v$ koşullarını sağlayan disklerden $t_e < t_s$ koşulunu da sağlayan çözümlerin de bulunduğu bu şekilde görülmektedir.

4: Eğrilikli Disk Modeli

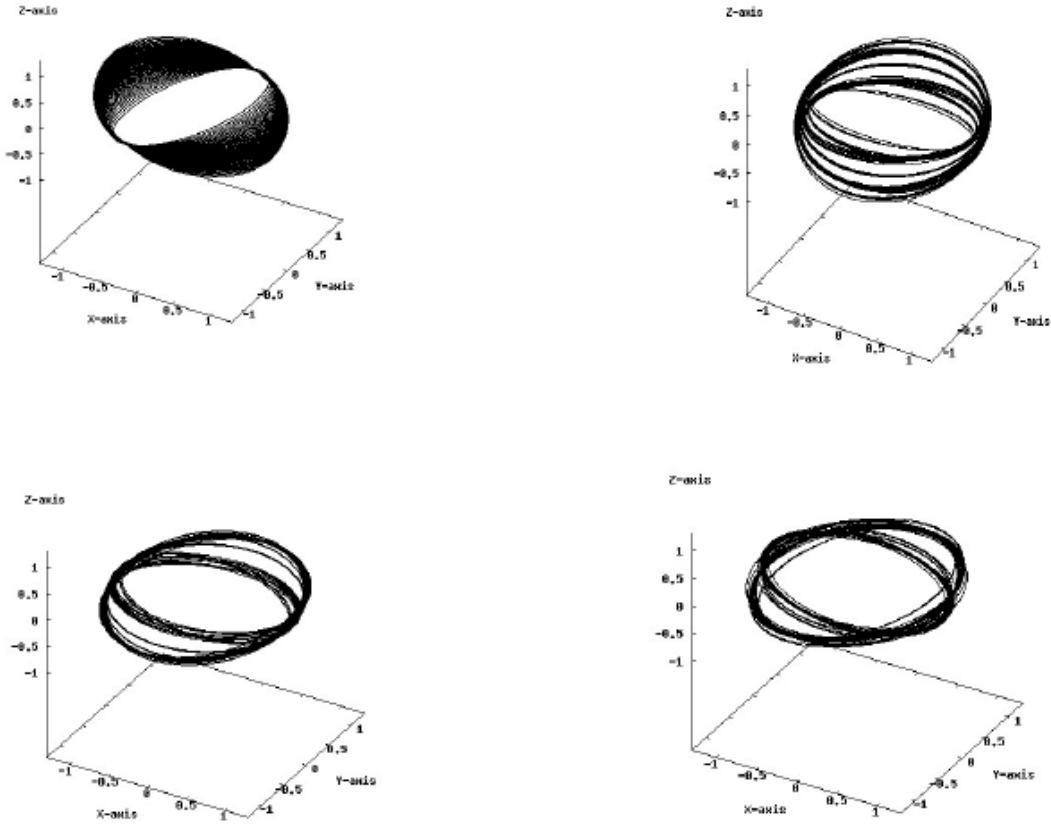
Kullandığımız modeldeki eğrilikli disk, noktasal bir kaynağı (kara delik) çevreleyen, içiçe geçmiş ve birbirine belirli açılarla eğimli dairesel halkaların toplamı olarak ele alındı.

Disklerin üzerine etkiyen iki döndürme momentinin diskin kendi öz çekiminden ve karadeliği çevreleyen yaşlı yıldız kümesinden kaynaklandığı varsayıldı. Bu kuvvetlerin oluşturduğu döndürme momenti, halkaların toplam disk açılal momentumu yönü etrafında presesyon hareketi yapmasına neden olur. Denge durumu, halkaların eğim açılarının zaman içinde değişmemesi koşulundan elde edilir: hareket denklemleri yazılır ve düğümler çizgisi etrafındaki döndürme momenti

$$\dot{p}_\theta = \frac{mr^2}{2} \dot{\phi}^2 \sin \theta \cos \theta - \dot{\phi} p_\psi \sin \theta - \left(\frac{\partial V_m(r, \theta, \phi)}{\partial \theta} + \frac{\partial V_g(r, \theta)}{\partial \theta} \right) \quad (6)$$

her halka için ortak bir presesyon frekansı $\dot{\phi}$ için sifira eşitlenir. Bu denklemin çözümleri denge durumundaki halkaların eğim açılarını verir. Burada m söz konusu olan halkanın kütlesi, r yarıçapı, θ presesyon düzlemine olan eğim açısıdır. $\partial V_m(r, \theta, \phi)/\partial \theta$ halkaların öz çekiminden kaynaklanan, $\partial V_g(r, \theta)/\partial \theta$ ise merkezdeki yıldız kümesinin kuadupol momentinden kaynaklanan döndürme momentini temsil eder. $\partial V_g(r, \theta)/\partial \theta$ terimi halkalara, sadece öz çekim etkisi altında ulaşacakları dengeden daha yüksek eğim açılı bir denge durumu sağlar.

Denklem (6) nın çözümü ile elde edilen denge durumuna gelen halkaların zaman içindeki hareketlerini inceleyebilmek için hareket denklemleri integre edilir. Şekil 4'te üzerine kütle aktarımı gerçekleşen bir diskin yarı kararlı bir denge durumu için evrimi gösterilmektedir. Diskin evrimi yaklaşık 200 yörünge dönemi boyunca takip edilmiştir.



Şekil 4: Üzerine kütle aktarımı gerçekleşen bir diskin yarı kararlı bir denge durumu için evrimi. Diskin evrimi yaklaşık 200 yörünge dönemi boyunca takip edilmiştir (soldan sağa ve yukarıdan aşağıya doğru).

Sonuçlar ve Özet

Bu çalışmada gökada merkezinde bulunan yıldız disklerinin bir eğrilikli disk orijini olabileceğini gösterdik. SgA* etrafında oluşan bir diskin üzerine merkezden kaynaklananışınım basıncının etkisinde eğrilik oluşabileceğini, bu eğriliğin derecesinin yaşlı yıldız kümesinin etkisiyle artabileceğini ve diskin yarı kararlı bir dengede şu an gözlenen yapıya ulaşabileceğini savunduk.

Kaynaklar:

Bartko ve diğ. 2008, hazırlık aşamasında
Cuadra, J., Armitage, P.J., Alexander, R.D., 2008, 'Stellar dynamical evidence against a cold disc origin for stars in the Galactic Centre', *MNRAS Letters*, 388, L64-L68

Gerhard, O., 2001, 'The Galactic Center HE I Stars: Remains of a Dissolved Young Cluster?', *Astrophysical Journal Letters*, 546, L39-L42

Genzel, R., Schödel, R., Ott, T., Eisenhauer, F., Hofmann, R., Lehnert, M., Eckart, A., Alexander, T., Sternberg, A., Lenzen, R., Clenet, Y., Lacombe, F., Rouan, D., Renzini, A., Tacconi-Garman, L.E. 2003, 'The Stellar Cusp around the Supermassive Black Hole in the Galactic Center', *Astrophysical Journal*, 594, 812-832

Levin, Y., Beloborodov, A.M. 2003, 'Stellar Disk in the Galactic Center: A Remnant of a Dense Accretion Disk?', *Astrophysical Journal Letters*, 590, L33-L36

Nayakshin, S., Dehnen, W., Cuadra, J., Genzel, R. 2006, 'Weighing the young stellar discs around Sgr A*', *MNRAS*, 366, 1410-1414

Paumard, T., Genzel, R., Martins, F., Nayakshin, S., Beloborodov, A.M., Levin,

Y., Trippe, S., Eisenhauer, F., Ott, T., Gillessen, S., Abuter, R., Cuadra, J., Alexander, T., Sternberg, A. 2006, 'The Two Young Star Disks in the Central Parsec of the Galaxy: Properties, Dynamics, and Formation', *Astrophysical Journal*, 643, 1011-1035

Petterson, J.A., 1977, 'Twisted accretion disks. I - Derivation of the basic equations', *Astrophysical Journal*, 214, 550-559

Pringle, J.E. 1997, 'Self-induced warping of accretion discs - Non-linear evolution and application to AGN', *MNRAS*, 292, 136+

Pringle, J.E. 1996, 'Self-induced warping of accretion discs', *MNRAS*, 281, 357-361

Toomre, A., 1964, 'On the gravitational stability of a disk of stars', *Astrophysical Journal*, 139, 1217-1238