



Araştırma Makalesi

Gökada Merkezlerindeki Maser Disklerin Denge Eğrilik Profillerinin Belirlenmesi

Ayşe ULUBAY*¹

¹*İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Fizik Bölümü, 34134, İstanbul, Türkiye*

*yazışılan yazar e-posta: aclubays@istanbul.edu.tr

(Alınış: 27.08.2022, Kabul: 08.11.2022, Yayımlanma: 25.11.2022)

Öz: Gökada merkezlerindeki süper kütleli kara delikleri çevreleyen maser diskler, merkezlerindeki kara deliğin kütlelerinin belirlenmesi ve kütle aktarım süreçlerinin incelenmesi gibi güncel astrofizik problemleri hakkında faydalı bilgiler sunar. Gözlemler, bu disklerin çoğu durumda düzlemsel olmayıp, eğrilik sergilediğine işaret etmektedir. Bu çalışmada, kütleleri ile iç ve dış yarıçapları gözlemlerden belirlenen, NGC 2960, NGC 5765b, NGC 6323, UGC 3789 ve NGC 6264 gökadalalarının merkezlerindeki eğri maser disklerin, tüm yarıçapları boyunca tek bir frekansta presesyon hareketi yapacakları denge durumları araştırılmıştır. Yapılan sayısal hesaplamalarda diskler, iç içe geçmiş, dairesel ve birbirlerine eğimli halkalar olarak modellenmiş ve disklerin öz-çekimleri göz önüne alınmıştır. Her bir maser disk için belli bir presesyon frekansına karşılık gelen denge eğrilik profilleri elde edilmiştir. Denge profilinin elde edildiği presesyon frekansı için, NGC 5765b maser diskinin toplam eğriliğinin yaklaşık 17°, diğer maser disklerin eğriliklerinin ise 10°'den küçük olduğu bulunmuştur.

Anahtar kelimeler: Gökada merkezleri, Kütle aktarım diskleri, Eğri diskler, Yöntemler: sayısal

Determination of Equilibrium Warp Profiles of Maser Discs in Galactic Nuclei

Abstract: Maser discs surrounding supermassive black holes in galactic nuclei provide useful information on astrophysical problems such as determining the masses of their central black holes and investigating the accretion processes. Observations indicate that these discs are often not planar, and exhibit warping. We investigated the warped equilibria, where the discs precess with a single frequency throughout their radial ranges, for the maser discs in the galaxies NGC 2960, NGC 5765b, NGC 6323, UGC 3789 and NGC 6264, whose masses, and inner and outer radii are given by the observations. In our numerical calculations the discs are modelled as concentric, circular and mutually tilted rings, and the self-gravity of the discs is taken into account. Warped equilibria corresponding to certain precession frequencies for each maser disc are obtained. It is found that for the precession frequency for which the equilibrium is obtained, the total warp in the maser disc of NGC 5765b is about 17° while the warps in the other maser discs are less than 10°.

Key words: Galactic nuclei, Accretion discs, Warped discs, Methods: numerical

1. Giriş

Gökada merkezlerinde bulunan süper kütleli kara delikler uygun koşullar oluştuğunda, kendilerini çevreleyen kütle aktarım diskleri tarafından beslenirler. Bir gökada merkezindeki kütle aktarım diskinin varlığına dair en sağlam ipuçlarından biri, NGC 4258 gökadasının merkezinin gözlemlerinden elde edilmiştir [1]. Bu gökadanın

merkezinden gözlenen maser ışınımı, yaklaşık $4 \times 10^7 M_{\odot}$ kütleli bir kara delikten 0.1-0.3 pc uzaklıkta, hafif eğriliğe sahip (diskin kara delikten farklı uzaklıklarda farklı eğiklik açılara sahip olduğu) bir kütle aktarım diskinin varlığına işaret etmektedir [1, 2]. Bugün, NGC 4258'den başka, merkezinde eğri bir maser disk bulundurduğu bilinen pek çok gökada vardır [3, 4, 5, 6].

Merkezi kara delikler etrafından gözlenen maser ışınımı için gerekli popülasyon tersinmesi, disklerde gaz yoğunluğunun 10^8 - 10^{10} cm^{-3} aralığında, sıcaklığın ise $\geq 250 \text{ K}$ olması durumunda gerçekleşebilir [7]. Bu disklerden salınan maser ışınımı, bakış doğrultusundaki radyal hız gradyentinin sıfıra yakın olduğu disk bölgelerinden gözlenir [7, 2]. Bu bölgelerden biri, gözlemci ile kara deliği birleştiren doğrultu üzerinde, diskten gözlemciye yakın olan kısmıdır. Buradaki maserlar, gökadanın sistemik hızında gözlenir, ve sistemik maserlar olarak adlandırılır. Işınımın gözlendiği diğer bölgeler ise, bakış doğrultusuna dik yöndeki disk çapı üzerinde, kara deliğin her iki tarafında bulunur. Burada bulunan maserlar, kara delik etrafında dönen diskten gözlemciden uzaklaşan tarafında sistemik hızdan kırmızıya kaymış tayf çizgileri, gözlemciye yaklaşan kısmında ise maviye kaymış tayf çizgileri üretir [7]. Kırmızıya ve maviye kaymış maserlar yüksek hız maserları olarak adlandırılır ve gözlenen kırmızıya/maviye kayma miktarı, merkezdeki karadeliğin kütlelerinin tahmininde kullanılır [1, 4, 6].

Eğri maser disklerin gözlemlerinden elde edilen bulgular, merkezi kara deliklerin kütlelerinin tahmini haricinde, süper kütleli kara delikler etrafında kütle aktarım sürecinin çalışılmasında [4, 2] ve Hubble sabitinin değerinin tahmininde [8, 9] önemli bilgiler sunar. Bu gözlemlerin doğru bir şekilde yorumlanabilmesi ise, maserların gözlendiği disklerin eğrilik profillerinin belirlenebilmesine bağlıdır.

Bahsi geçen diskler eğriliklerini, dönen kara delikler etrafında Lense-Thirring presesyonu ile oluşan Bardeen-Petterson etkisi sonucunda [10, 11, 12] veya yakın bir yüksek kütleli cisim ile etkileşim sonucunda [13] kazanmış olabilirler. Diskin kütlelerinin kara deliğin kütlelerine oranla ihmal edilemeyecek kadar yüksek olduğu durumlarda, diskten öz-çekimi, diferansiyel presesyon etkisi ile dağılmasını engelleyebilir ve belli disk kütleleri ve dış/iç yarıçap oranlarındaki diskler için diskten merkezden tüm uzaklıklarda aynı presesyon frekansı ile döndüğü denge eğrilik açıları bulunabilir [14].

Bu çalışmada, iç ve dış yarıçapları ile kütleleri gözlemsel çalışmalarda verilen NGC 2960 (Mrk 1419), NGC 5765b, NGC 6323, UGC 3789 ve NGC 6264 gökadalalarının merkezlerindeki maser disklerin öz-çekimleri göz önüne alınarak eğrilik profilleri ilk kez hesaplanmıştır. 2. kısımda, disklerin denge eğrilik profillerini belirlemede kullanılan denklemler verilmiş ve sayısal düzenek sunulmuştur. Çalışmadan elde edilen bulgular 3. kısımda, sonuçlar ve yorumlar ise 4. kısımda verilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 Model

Bu çalışmada diskler, iç içe geçmiş, dairesel, birbirleri ile kütleçekimsel olarak etkileşen, birbirlerine eğimli halkalar olarak ele alınmıştır. Böyle bir halkalar sisteminde m_i kütlelerine ve r_i yarıçapına sahip i . halkanın hareket denklemleri aşağıdaki şekilde verilir [15, 14]

$$p_{\theta_i} = \frac{m_i r_i^2}{2} \dot{\theta}_i, \quad (1)$$

$$p_{\phi_i} = \frac{m_i r_i^2}{2} \dot{\phi}_i \sin^2 \theta_i + p_{\psi_i} \cos \theta_i, \quad (2)$$

$$\dot{p}_{\theta_i} = \frac{m_i r_i^2}{2} \dot{\phi}_i^2 \sin \theta_i \cos \theta_i - \dot{\phi} p_{\psi_i} \sin \theta_i - \frac{\partial V_i}{\partial \theta_i}, \quad (3)$$

$$\dot{p}_{\phi_i} = -\frac{\partial V_i}{\partial \phi_i}. \quad (4)$$

Burada θ_i , i . halkanın presesyon düzlemine olan eğikliği, ϕ_i azimut açısı ve ψ_i , her hangi bir parçacığın halka üzerindeki konumudur. p_{θ_i} düğümler çizgisi etrafındaki açısal momentumu, p_{ϕ_i} presesyon düzlemine dik olan z-ekseni etrafındaki açısal momentumu ve $p_{\psi_i} = m_i r_i^2 \Omega(r_i)$ yörünge açısal momentumunu temsil eder. $\Omega(r_i) = \sqrt{GM_{\text{kd}}/r_i^3}$, M_{kd} kütleli bir kara deliğin etrafında r_i yarıçapındaki bir halkanın açısal hızıdır (G kütleçekim sabiti olmak üzere). Kütleçekimsel potansiyel enerji V_i , biri merkezdeki kara delikten, diğeri ise i . halkanın diğer tüm halkalarla etkileşiminden kaynaklanan iki bileşenden oluşur. Bu bileşenlerin θ ve ϕ açılara göre türevleri, bir halkanın üzerine etkiyen ve sırasıyla presesyona ve nutasyona neden olan torkları verir.

Belli birer kütle (m_i), yarıçap (r_i) ve presesyon frekansına ($\dot{\phi}$) sahip halkalardan oluşan bir disk için Denklem 3'ün tüm halkalar için aynı anda çözülmesi ($\dot{p}_{\theta_i} = 0$), halkaların denge eğrilik açılarını (θ_i) verir. Bu durumda tüm halkalar aynı presesyon frekansı ile döner. Denklem 3'ün sayısal olarak nasıl çözüldüğü ile ilgili ayrıntılar [15, 14] çalışmalarında verilmiştir.

2.1 Sayısal düzenek ve disk parametreleri

Bu çalışmada disklerin eşit radyal aralıklı 50 halkadan oluştuğu kabul edilmiştir. Böyle bir halkalar sistemi için disklerin toplam kütleleri (M_d),

$$M_d = \sum_{i=1}^n 2\pi r_i \Delta r \Sigma(r_i) \quad (5)$$

ifadesine göre hesaplanır. Burada n , toplam halka sayısı, Δr halkalar arası uzaklık, $\Sigma(r_i)$ ise diskin yüzey yoğunluğu profilidir. Modellerde yüzey yoğunluğunun merkezden uzaklık ile $1/r$ şeklinde azaldığı varsayılmıştır. Bu çalışmada modellenen disklerin literatürden alınan farklı gözlemsel çalışmalardan elde edilmiş olan ve bu çalışmada kullanılan iç ve dış yarıçapları ile kütle değerleri, ayrıca merkezlerindeki kara deliğin kütlesi aşağıda verilmektedir.

NGC 2960 (Mrk 1419)

NGC 2960 gökadasının merkezinde yaklaşık $1.2 \times 10^7 M_{\odot}$ kütleli bir kara delik bulunmaktadır [3, 6]. Kara deliğin etrafındaki maser diskin iç yarıçapı $r_{iç} = 0.13 pc$, dış yarıçapı ise $r_{dış} = 0.31 pc$ olarak gözlenmiştir [6, 16]. Diskin belirtilen yarıçap aralığındaki toplam kütlesi yaklaşık $M_d = 4 \times 10^4 M_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır [16]. Diskin özellikle dış kısımlarında eğrilik gözlenmekte olup, kalınlığı ihmal edilebilir derecede olmayabilir [6].

NGC 5765b

NGC 5765b'nin merkezindeki kara deliğin kütlesi yaklaşık $4.6 \times 10^7 M_{\odot}$ olarak belirlenmiştir [5, 17]. Kara deliği çevreleyen maser diskin iç yarıçapı $r_{iç} = 0.3 pc$, dış yarıçapı ise $r_{dış} = 1.2 pc$ olarak gözlenmiştir. Diskin bu radyal aralıktaki toplam kütlesi $M_d = 6.8 \times 10^5 M_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır [16]. Modeller, diskin ince disk modelleri ile tutarlı olduğuna ve eğriliğinin karmaşık olmayan bir yapıda olduğuna işaret etmektedir [16].

NGC 6323

NGC 6323 gökadasının merkezindeki kara deliğin kütlesi yaklaşık $9.9 \times 10^6 M_{\odot}$ olarak belirlenmiştir [17, 16] ve kara deliği çevreleyen maser diskin iç yarıçapı $r_{i\check{c}} = 0.15 pc$, dış yarıçapı ise $r_{dış} = 0.31 pc$ olarak gözlenmiştir [16]. Diskin bu radyal aralıktaki toplam kütlesi $M_d = 5 \times 10^4 M_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır [16]. Modeller, diskin Keplersel dönme gösteren, ince bir disk olduğuna işaret etmektedir [6].

UGC 3789

UGC 3789 gökadasının merkezindeki kara deliğin kütlesi yaklaşık $10^7 M_{\odot}$ olarak belirlenmiş ve kara deliği çevreleyen maser diskin iç yarıçapı $r_{i\check{c}} = 0.08 pc$, dış yarıçapı ise $r_{dış} = 0.20 pc$ olarak gözlenmiştir [18, 6, 16]. Diskin bu radyal aralıktaki toplam kütlesi $M_d = 7 \times 10^3 M_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır [16]. Disk, bakış doğrultusunda eğrilige sahip olup, Keplersel dönme gösteren, ince bir disk ile tutarlıdır [6].

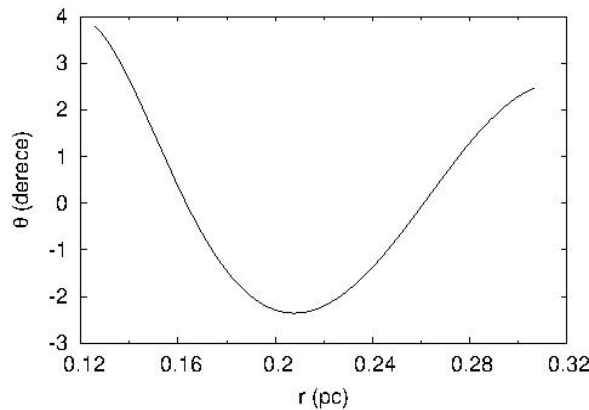
NGC 6264

NGC 6264 gökadasının merkezindeki kara deliğin kütlesi yaklaşık $3 \times 10^7 M_{\odot}$ olarak belirlenmiştir [6, 19, 16]. Kara deliği çevreleyen maser diskin iç yarıçapı $r_{i\check{c}} = 0.27 pc$, dış yarıçapı ise $r_{dış} = 0.48 pc$ olarak gözlenmiştir [16]. Diskin bu radyal aralıktaki toplam kütlesi $M_d = 3 \times 10^5 M_{\odot}$ olarak hesaplanmıştır [16]. Disk, az derecede eğrilige sahiptir [6].

3. Bulgular

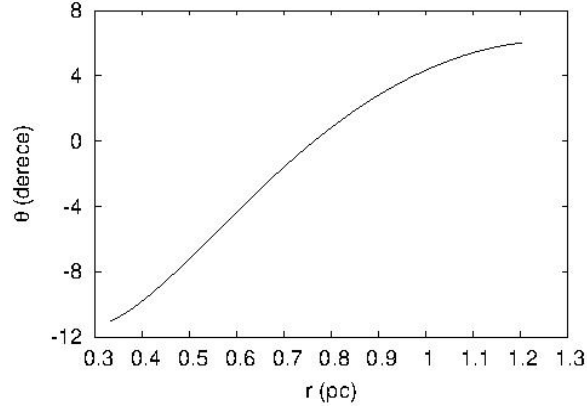
Bu bölümde, disklerin denge eğrilik profillerine dair elde edilen bulgular sunulmaktadır. Şekillerde yatay eksenler kara delikten uzaklığı, dikey eksenler ise Denklem 3'ün çözümünden elde edilen denge eğrilik açılarını göstermektedir.

Şekil 1'de NGC 2960 gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili gösterilmektedir. Denge durumu, presesyon frekansının en içteki halkanın açılal frekansına oranı $|\dot{\phi}/\Omega_1| = 4 \times 10^{-3}$ değeri için elde edilmiştir. Denge durumunda en içteki halka 4° eğikliğe sahipken, en dıştaki halka yaklaşık 3° eğikliğe sahiptir. Bu aralıkta diskin, yaklaşık $0.16 pc$ ve $0.26 pc$ 'de olmak üzere iki kez presesyon düzlemini ($\theta = 0^\circ$) kestiği görülmektedir. $0.13 pc < r < 0.16 pc$ ve $0.26 pc < r < 0.31 pc$ radyal aralıklarındaki halkalar pozitif eğikliğe sahipken, $0.16 pc < r < 0.26 pc$ aralığındaki halkalar negatif eğikliğe sahiptir.



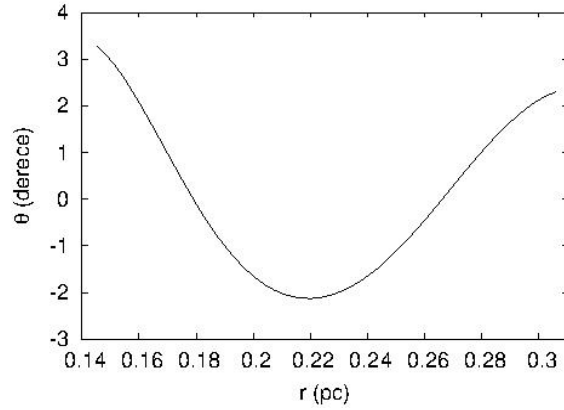
Şekil 1. NGC 2960 gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili. En içteki halka 4° , dıştaki halka ise yaklaşık 3° eğikliğe sahiptir. Diskin, presesyon düzlemini iki farklı yarıçapta kestiği görülmektedir.

NGC 5756b gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili Şekil 2’de gösterilmektedir. Bu disk için denge, $|\dot{\phi}/\Omega_1| = 2 \times 10^{-3}$ değeri için elde edilmiştir. Bulunan bu denge durumunda en içteki halkanın eğikliği yaklaşık -11° , en dıştaki halkanın eğikliği ise yaklaşık 6° ’dir. Disk, yaklaşık $0.7 pc$ ’de presesyon düzlemini kesmektedir.



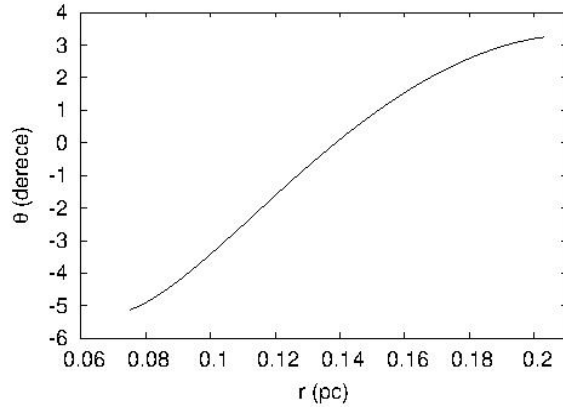
Şekil 2. NGC 5756b gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili. En içteki halkanın eğikliği yaklaşık -11° , en dıştaki halkanın eğikliği ise yaklaşık 6° ’dir.

Şekil 3’te NGC 6323 gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili verilmiştir. Denge durumu, $|\dot{\phi}/\Omega_1| = 1 \times 10^{-2}$ değeri için elde edilmiştir. Bu denge durumu için, diski oluşturan en içteki halka yaklaşık 3° , en dıştaki halka ise yaklaşık 2° eğikliğe sahiptir. NGC 2960 maser diski gibi, bu maser disk de farklı iki yarıçapta ($0.18 pc$ ve $0.26 pc$) presesyon düzlemini kesmektedir.



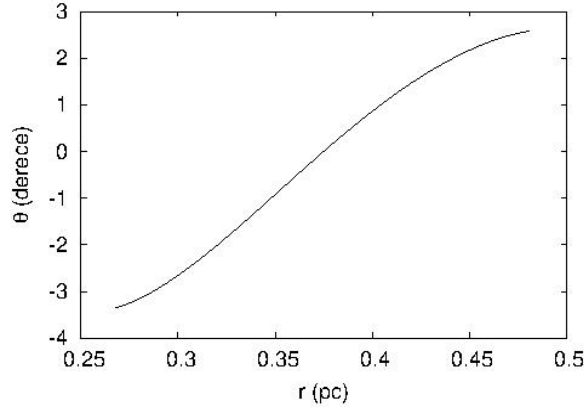
Şekil 3. NGC 6323 gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili. En içteki halka 3° , en dıştaki halka ise yaklaşık 2° eğikliğe sahiptir. Disk, presesyon düzlemini iki farklı yarıçapta kesmektedir.

UGC 3789 maser diskinin denge eğrilik profili Şekil 4’te gösterilmektedir. Bu disk için denge, $|\dot{\phi}/\Omega_1| = 2 \times 10^{-4}$ değeri için elde edilmiştir. Bulunan bu denge durumunda en içteki halkanın eğikliği yaklaşık -5° , en dıştaki halkanın eğikliği ise yaklaşık 3° ’dir. Disk, yaklaşık $0.14 pc$ ’de presesyon düzlemini kesmektedir.



Şekil 4. UGC 3789 gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili. En içteki halkanın eğikliği yaklaşık -5° , en dıştaki halkanın eğikliği ise yaklaşık 3° 'dir.

Son olarak Şekil 5'te NGC 6264 maser diskinin denge eğrilik profili gösterilmektedir. Bu disk için denge $|\dot{\phi}/\Omega_1| = 1 \times 10^{-2}$ değeri için elde edilmiştir. Bulunan bu denge durumunda en içteki halkanın eğikliği yaklaşık -3° , en dıştaki halkanın eğikliği ise yaklaşık 3° 'dir. Disk, yaklaşık $0.4 pc$ 'de presesyon düzlemini kesmektedir.



Şekil 5. NGC 6264 gökadasının merkezindeki maser diskin denge eğrilik profili. En içteki halkanın eğikliği yaklaşık -3° , en dıştaki halkanın eğikliği ise yaklaşık 3° 'dir.

4. Sonuç ve Yorum

Bu çalışmada NGC 2960, NGC 5765b, NGC 6323, UGC 3789 ve NGC 6264 gökadalalarının merkezi kara deliklerinin etrafında bulunan maser disklerin öz-çekimleri göz önüne alınarak denge eğrilik profillerinin bulunabileceği gösterilmiştir.

Daha önceden bu disklerle ilgili yapılan çalışmalarda çoğunlukla merkezi kara deliklerin kütleleri belirlenmeye çalışılmış [3, 17, 6, 5] ve disklerin gözlenen radyal aralıklardaki toplam kütleleri belirlenmiştir [16]. Disklerin öz-çekim etkisi altındaki davranışları ve buna bağlı eğrilikleri hakkında ayrıntılı bir araştırmaya yer verilmemiştir.

Bahsi geçen disklerin gözlemlerinden elde edilen konum-hız grafiklerinden, merkezlerindeki kara deliklerin kütlesi belirlenebilir [6, 16]. Konum-hız grafiklerinin yorumlanmasında ise disklerin geometrisi önemli bir rol oynamaktadır. Düzlemsel geometri sergileyen ve öz-çekimi ihmal edilebilen bir disk Keplersel dönme gösterirken, diskin eğri olduğu ve/veya öz-çekiminin ihmal edilemediği durumlarda dönmenin

Kepler dönmesinden sapma sergilemesi beklenir. Bu etkilerin hangisi/hangilerinin diskin konum-hız grafiğine ne ölçüde katkı sağlayacağı ise ancak ayrıntılı modellerle belirlenebilir.

Bu çalışmada, öz-çekimleri göz önüne alındığında NGC 2960, NGC 5765b, NGC 6323, UGC 3789 ve NGC 6264 maser disklerinin her biri için, disklerin tüm yarıçapları boyunca aynı presesyon frekansı ile döneceği denge eğrilik açılarının bulunabileceği gösterilmiştir. Denge durumlarının elde edildiği presesyon frekansları disklerin iç yarıçapındaki dönme frekansına oranlandığında $2 \times 10^{-4} - 1 \times 10^{-2}$ aralığındadır. Denge durumunda NGC 5765b maser diskinin iç ve dış yarıçapları arasındaki toplam eğriliğin yaklaşık 17° olduğu, diğer maser disklerin eğriliklerinin ise 10° 'den küçük olduğu bulunmuştur. Bu çalışmada ele alınan maser disklerin gözlemleri, disklerin hafif derecede eğri olduğuna işaret etmektedir [5, 6, 8, 16], dolayısı ile bulduğumuz sonuçlar bu gözlem sonuçları ile uyumlu görünmektedir. Çalışmamızda ayrıca NGC 2960 ve NGC 6323 maser disklerinin presesyon düzlemini iki farklı yarıçapta kestiği, NGC 5765b, UGC 3789 ve NGC 6264 maser disklerinin ise disklerin orta kısımlarına yakın noktalarda presesyon düzlemini bir kez kestiği gösterilmiştir. İleride yapılacak gözlemsel çalışmalarda disklerin kütle, yarıçap, yüzey yoğunluğu ve eğrilik profili gibi parametreleri hakkında yeni bulguların ortaya çıkması durumunda çalışmamız yeni parametreleri göz önüne alacak şekilde güncellenebilir ve gözlemlerle daha ayrıntılı karşılaştırmalar yapılabilir.

Bu çalışmadan elde edilen eğrilik profilleri, daha sonra gerçekleştirilebilecek çalışmalarda disklerin (i) uzun zaman ölçekli evrimlerinin çalışılarak kararlılıklarının araştırılmasında, (ii) disklerin belli bir zaman aralığı içindeki konum-hız grafiklerinin ve buradan da merkezi kara deliklerin kütlelerinin elde edilmesinde kullanılabilir.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyanı

Ayşe Ulubay: Kavramsallaştırma, Araştırma, Kaynak/Materyal/Malzeme Temini, Orijinal Taslak Yazımı, Görselleştirme

Destek ve Teşekkür Beyanı

Bu çalışmanın yazarı olarak herhangi bir destek ve teşekkür beyanım bulunmadığını bildiririm.

Çatışma Beyanı

Bu çalışmanın yazarı olarak herhangi bir çatışma beyanım bulunmadığını bildiririm.

Etik Kurul Onayı ve/veya Aydınlatılmış Onam Bilgileri

Bu çalışmanın yazarı olarak herhangi bir etik kurul onayı ve/veya aydınlatılmış onam bilgileri beyanım bulunmadığını bildiririm.

Kaynakça

- [1] M. Miyoshi, J. Moran, J. Herrnstein, L. Greenhill, N. Nakai, P. Diamond, and M. Inoue, "Evidence for a black hole from high rotation velocities in a sub-parsec region of NGC4258," *Nature*, 373, 127-129, 1995.
- [2] J. R. Herrnstein, J. M. Moran, L. J. Greenhill, and A. S. Trotter, "The geometry of and mass accretion rate through the maser accretion disk in NGC 4258," *ApJ*, 629, 719-738, 2005.
- [3] C. Henkel, J. A. Braatz, L. J. Greenhill, and A. S. Wilson, "Discovery of water vapor megamaser emission from Mrk 1419 (NGC 2960): An analogue of NGC 4258?," *A&A*, 394, L23-L26, 2002.
- [4] L. J. Greenhill, R. S. Booth, S. P. Ellingsen, J. R. Herrnstein, D. L. Jauncey, P. M. McCulloch, J. M. Moran, R. P. Norris, J. E. Reynolds, and A. K. Tzioumis, "A warped accretion disk and wide-angle outflow in the inner parsec of the Circinus galaxy," *ApJ*, 590, 162-173, 2003.

- [5] F. Gao, J. A. Braatz, M. J. Reid, K. Y. Lo, J. J. Condon, C. Henkel, C. Y. Kuo, C. M. V. Impellizzeri, D. W. Pesce, and W. Zhao, “The Megamaser Cosmology Project. VIII. A geometric distance to NGC 5765b,” *ApJ*, 817, 128 (17p), 2016.
- [6] C. Y. Kuo, J. A. Braatz, J. J. Condon, C. M. V. Impellizzeri, K. Y. Lo, I. Zaw, M. Schenker, C. Henkel, M. J. Reid, and J. E. Greene, “The Megamaser Cosmology Project. III. Accurate masses of seven supermassive black holes in active galaxies with circumnuclear megamaser disks,” *ApJ*, 727, 20 (15p), 2011.
- [7] J. F. Kartje, A. Königl, and M. Elitzur, “Megamaser disks in active galactic nuclei,” *ApJ*, 513, 180-196, 1999.
- [8] M. J. Reid, J. A. Braatz, J. J. Condon, K. Y. Lo, C. Y. Kuo, C. M. V. Impellizzeri, and C. Henkel, “The Megamaser Cosmology Project. IV. A direct measurement of the Hubble constant from UGC 3789,” *ApJ*, 767, 154 (11p), 2013.
- [9] C. Y. Kuo, J. A. Braatz, K. Y. Lo, M. J. Reid, S. H. Suyu, D. W. Pesce, J. J. Condon, C. Henkel, and C. M. V. Impellizzeri, “The Megamaser Cosmology Project. VI. Observations of NGC 6323,” *ApJ*, 800 (1), 26 (9p), 2015.
- [10] J. M. Bardeen and J. A. Petterson, “The Lense-Thirring effect and accretion disks around Kerr black holes,” *ApJ Letters*, 195, L65-L67, 1975.
- [11] S. Kumar and J. E. Pringle, “Twisted accretion discs - The Bardeen-Petterson effect,” *MNRAS*, 213, 435-442, 1985.
- [12] A. Caproni, Z. Abraham, and Herman J. Mosquera Cuesta, “Bardeen-Petterson effect and the disk structure of the Seyfert galaxy NGC 1068,” *ApJ*, 638, 120-124, 2006.
- [13] J. C. B. Papaloizou, C. Terquem, and D. N. C. Lin, “On the global warping of a thin self-gravitating near-Keplerian gaseous disk with application to the disk in NGC 4258,” *ApJ*, 497, 212-226, 1998.
- [14] A. Ulubay-Siddiki, O. Gerhard, and M. Arnaboldi, “Self-gravitating warped discs around supermassive black holes,” *MNRAS*, 398, 535-547, 2009.
- [15] M. Arnaboldi and J. S. Sparke, “Self-gravitating polar rings in axisymmetric and triaxial galaxy potentials,” *AJ*, 107, 958-970, 1994.
- [16] C. Y. Kuo, M. J. Reid, J. A. Braatz, F. Gao, C. M. V. Impellizzeri, and W. T. Chien, “On estimating the mass of Keplerian accretion disks in H₂O maser galaxies,” *ApJ*, 859, 172 (12p), 2018.
- [17] J. Braatz, L. Greenhill, M. Reid, J. Condon, C. Henkel, and K. Y. Lo, “Precision cosmology with H₂O megamasers: progress in measuring distances to galaxies in the Hubble flow,” in *Proc. Astrophysical Masers and their Environments, Proceedings IAU Symposium No. 242*, Alice Springs, 2007, pp. 399–401.
- [18] J. A. Braatz and N. E. Gugliucci, “The discovery of water maser emission from eight nearby galaxies,” *ApJ*, 687, 96-101, 2008.
- [19] C. Y. Kuo, J. A. Braatz, M. J. Reid, K. Y. Lo, J. J. Condon, C. M. V. Impellizzeri, and C. Henkel, “The Megamaser Cosmology Project. V. An angular-diameter distance to NGC 6264 at 140 Mpc,” *ApJ*, 767, 155 (13p), 2013.