

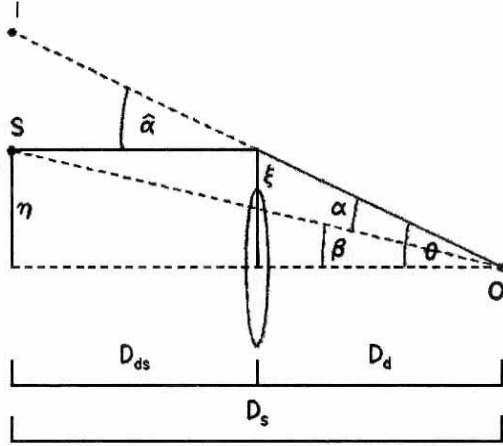
## Mikromercek Etkisinin Astrofizikteki Kullanım Alanları

Can Buğra Girgin

İstanbul Üniversitesi, Fen Fakültesi, Astronomi ve Uzay Bilimleri Bölümü,  
İstanbul

### 1 – Giriş

Işınların kütle çekimiyle yollarından sapması Genel Görelilik Teorisinin bir sonucu olarak ortaya konmuştur. Her ne kadar bu sonuç 1900'lere ait olsa da ışınların böyle bir sapmaya maruz kalabileceğine dair olan olasılık daha önceleri Newton ve Laplace tarafından da öngörülmüştür. Sonuç olarak Einstein'ın iddiası 1919'daki tam Güneş tutulması sırasında Güneş'in kenar bölgesi civarındaki yıldızların konumlarının ölçüldüğü gözlemlerle (Dyson, Eddington & Davidson 1920) ispatlanmış oldu.



Şekil 1-5 : Bir kütle çekimsel mercek sisteminin gösterimi.

Şekilde bir noktasal kütle neden olduğu mercek etkisinin geometrisi gösterilmektedir. S kaynağından çıkan ışık, mercek etkisine maruz kalarak  $\hat{\alpha}$  açısı kadar saptırılarak O noktasındaki gözlemciye ulaşır. Kaynak ile optik eksen arasındaki açı  $\hat{\beta}$  ve I görüntüsü ile optik eksen arasındaki açı  $\hat{\theta}$ 'dir.  $D_s$  gözlemci ile kaynak arasındaki mesafe,  $D_d$  gözlemci ile mercek arasındaki mesafe,  $D_{ds}$

mercek ile kaynak arasındaki mesafe olarak gösterilmiştir.

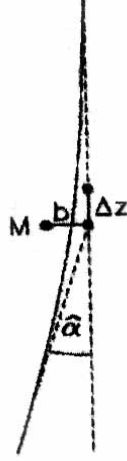
Kaynaktan yayılan ışınların mercek etkisine maruz kaldığı durum üç aşamada incelenir :

- Kaynaktan merceğe kadar olan pertürbasyon etkisinin olmadığı farz edilen alan;
- Işınların kütle tarafından sapmaya uğratıldığı alan;
- Mercekten gözlemciye kadar olan ve pertürbasyon etkisinin olmadığı farz edilen alan.

Merceğe yakın bölgede ışığın maruz kaldığı sapmayı incelediğimizde söz konusu bölgedeki kütle dağılımının neden olduğu zayıf Newton kütle çekim potansiyelinin, kısmi olarak basık bir Minkowski uzay-zamanında pertürbe ettiğini söyleyebiliriz. Bu ele alış Newton kütle çekim potansiyelinin ( $|\Phi| \ll c^2$ ) ve merceğin öz hızının ( $v \ll c$ ) yeterince küçük olduğu durumlar için tutarlıdır. Mercek etkisine neden olan ve kırmızıya kayma miktarı  $\Delta z = 0,3$  olan bir gökadanın, kırmızıya kayma miktarı  $\Delta z = 1$  olan bir kaynaktan gelen ışığı saptırdığı durumu örnek olarak alırsak; kaynaktan merceğe kadar olan mesafe ve mercekten gözlemciye kadar olan mesafe  $\sim 1$

Gpc veya gökada çapının üçüncü kuvveti mertebesindedir. Söz konusu değerlere göre ışığın 2.alanda aldığı yol yani mercek etkileşiminde ışığın sapmaya uğratıldığı bölgede aldığı yol, kaynaktan gözlemciye gelene kadar olan tüm yola kıyasla yeterince küçük bir büyüklük olarak karşımıza çıkar. Gökada içi görelî öz hızların  $\sim 10^3 \text{ kms}^{-1} \ll c^2$  mertebesinde olduğu ve Newton kütle çekim potansiyelinin  $|\Phi| < 10^{-4}c^2 \ll c^2$  mertebesinde olması yukarıda belirtilenlerle tutarlıdır. Böyle bir noktasal kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli

$$\Phi(b, z) = -\frac{GM}{(b^2 + z^2)^{1/2}} \text{ şeklinde ifade edilir.}$$



Şekil 1-3 : Bir noktasal kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli.

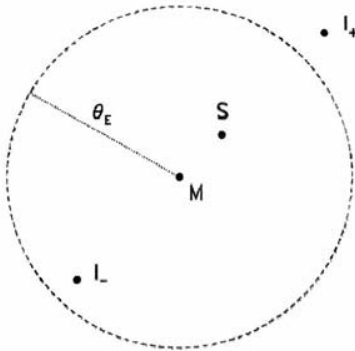
Şekil noktasal kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli. Şekil noktasal kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli. Şekil noktasal kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli.

$$\text{sapma açısı } \hat{\alpha} = \frac{2}{c^2} \int \nabla_{\perp} \Phi dz = \frac{4GM}{c^2 b} \text{ şeklinde gösterilir.}$$

Noktasal kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli ise gerekli işlemler yapırsa

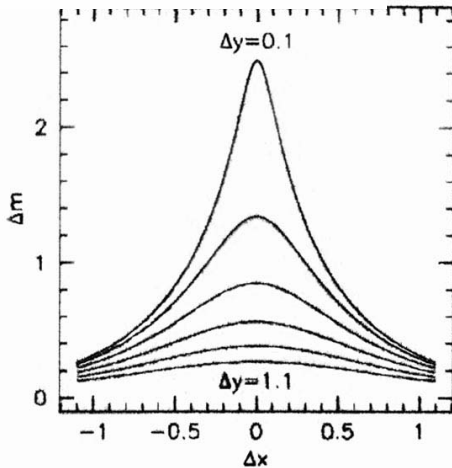
$$\theta_E = \left( \frac{4GM}{c^2} \frac{D_{ds}}{D_d D_s} \right)^{1/2} \text{ olarak bulunur.}$$

## 2 - Gökada İçi Mikromercek Araştırmaları



Şekil 1-7 : M noktasal kütle tarafından mercek etkisine uğrayan S kaynağı ve  $I_+$ ,  $I_-$  görüntülerinin bağıl konumları. Kesik çizgili daire,  $\theta_E$  yarıçaplı Einstein Çemberi'dir. Bir görüntü Einstein çemberinin içinde oluşurken diğeri dışında oluşmaktadır.

Bir nokta kaynağın mercek etkisine neden olan noktasal kütle ile en yakın olduğu durum, kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli. Bir nokta kaynağın mercek etkisine neden olan noktasal kütle ile en yakın olduğu durum, kütle için olan Newton kütle çekim potansiyeli.

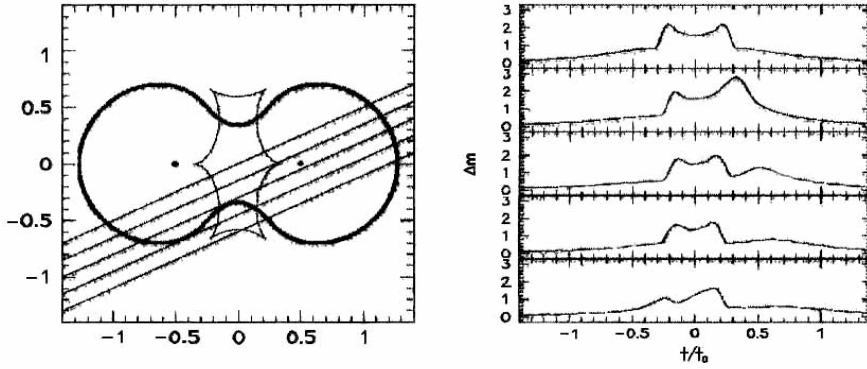


Şekil 1-9 : Kaynak ve mercek arasındaki 6 minimum ayrılık için ( $\Delta y = 0.1, 0.3, \dots, 1.1$ ) mikromercek etkisinin görüldüğü ışık eğrileri. Ayrıklık Einstein yarıçapı biriminde verilmektedir.

1,34'lük büyütme  $0^m,32'$ lik kolayca fark edilebilen bir artışa karşılık gelir. Gökada içindeki kaynakların küçük bir bölümünde böyle bir büyütme aramak için Paczynski (1986b) LMC'deki milyonlarca yıldız görüntülemeyi önermişti. Yeterince olay saptanabilseydi, gökadamızdaki yıldız kütleindeki cisimlerin dağılımına dair bir haritalama yapılabilecekti. Fakat Paczynski'nin önerdiği fikrin en önemli sorunu, milyonlarca yıldız gözleminin çok fazla sayıda değişen yıldız saptanmasına neden olmasıydı. Bu iş için gerçekten değişen yıldızlarla, değişimleri mikromercek etkileşimlerine bağlı olan yıldızların ayırılması gerekiyordu.

Mercek etkisine maruz kalan yıldızların ışık eğrilerinin kendilerine özgü bir şekilleri vardır. Bu ışık eğrilerinin zamana göre simetrik olması beklenir ve ışığın kütle çekimiyle bükülmesi dalgaboyuna bağlı olmadığından renksememesi gerekir. Buna karşın bilindiği üzere gerçekten değişen yıldızlar tipik olarak asimetrik ışık eğrilerine sahiplerdir ve renk değişimleri gösterirler.

Mikromercek gözlemleri ilk olarak karanlık maddenin büyük kütleli kompakt halo cisimleri formunda araştırmaları için önerülmüştür. Bu araştırmaların verimliliği sonrasında gözlemler gökada şişkin bölgesine yöneltilmiştir. Buradaki olayların çoğunun gökada diskinde yer alan normal yıldızlar ve şişkin bölgenin kendisinden kaynaklanması bekleniyordu. Fakat OGLE ve MACHO araştırmaları sırasında belirlenen olayların oranı asimetrik gökada modeli ve diğer modellerle öngörülenlerden fazlaydı. Bu sayede mikromercek etkileşimlerinin gökada yapısının araştırılmasında nemli bir belirteç olduğu anlaşıldı. Devamında Paczynski'nin gökadanın şişkin bölgesindeki kompakt cisimlerin mikromercek etkisinin LMC'deki yıldızların ışık eğrilerinden belirlenebileceği fikri MACHO, OGLE, EROS, DUO gibi birçok farklı grubu bu çalışmalara yöneltmiştir. Araştırmaların sonucunda 100'den fazla mercek etkileşimi gözlemlendi ve sayı artmaya devam etti. Bu olayların çoğu gökada şişkin bölgesi civarında gözlemlenmiştir ve çoğu tek merceğe bağlı elde edilen ışık eğrisi olup bir kısmı ise çift mercek



etkileşimlerine dayanmaktadır.

Şekil 1-10 : Sol panel; iki eşit noktasal kütleli oluşan bir çift mercek. Kritik eğri koyu çizgi ile ve buna karşılık gelen kostik 6 uçlu ince çizgi ile gösterilmiştir. Bu mercek sisteminden geçen 5 kaynak yörüngesi belirtilmiştir. Sağ panel; sol panelde belirtilen yörüngeler boyunca hareket eden yaygın bir kaynağın ışık eğrileri. Kaynak her iki merceğe de yaklaştıkça çift tepeli şekil ortaya çıkmaktadır.

Mao ve Paczynski (1991) yaptıkları tahminlere göre kaynakların bir veya daha çok mercek etkisi alanından geçtiği kuvvetli çift mercek etkileşimleri tüm olayların %10'unu teşkil etmektedir. Çift

mercek etkileşimleri tek mercekle etkileşimlerinden tipik olarak çift tepeli veya asimetrik ışık eğrileriyle kolayca ayırt edilebilirler. Çift mercekle araştırmalarının hassasiyeti uzak yıldızların yakın çevresinde gezegen araştırmaları için de dikkat çekici bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 3 - Mikromercekle Etkisiyle Yıldız Atmosferleri Araştırmaları

Güneş'in çeşitli bantlardaki veya tayfsal çizgilerdeki profilini ölçerek yüksekliğin bir fonksiyonu olarak atmosfer hakkında bilgi edinilebilir. Çözümlemesi çok zor olduğundan Güneş dışında başak bir yıldız için benzer ölçümleri yapmak güçtür. Kostik; yani merceğin büyütme etkisinin çok büyük değerlere ulaştığı bölge hizasında olan geçişlere dayanan mikromercekle olaylarında söz konusu olabilecek ayırma güçlerine ulaşmak mümkündür. Bunun nedeni yıldızın kostik geçişi sırasında yıldızın farklı bölgelerinin farklı zamanlarda güçlü büyütme etkisine maruz kalmasıdır.

Yıldız tutulmalarının yanısıra gezegen geçişleri de kenar kararması ölçümlerine imkan sağlayabilir. Witt (1995), Valls-Gabaud (1995), Bagdanov & Cherepashchuk mikromercekle etkileşimlerine dair ışık eğrilerinin kenar kararmasından etkilenebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca ilk olarak Albrow ve ark. (2001a) uyumlu yıldız atmosferleri modelleri arasında ayırım yapabilmek için, mikromercekle kenar kararması ölçümlerini kullanmanın gerekli yöntemlerini geliştirmişlerdir.

Mikromercekle etkisinin tayfsal etkileri ilk olarak Mao & Paczynski (1994) ve Valls & Gabaud (1995) tarafından araştırılmıştır. Valls-Gould (1996 -1998) mikromercekle büyütmesi şekilleriyle yıldız tayfının ilişkisini modellemiş ve bir seri tayfsal ölçümden 3 boyutlu atmosferik profilin yaratılabileceğini öne sürmüşlerdir. Bu güne kadar tayfı temiz bir şekilde çözümlenebilmiş yegane mikromercekle olayı EROS BLG-2000-5'tir. Bu olayda bir K 3 yıldızının önünden çift mercekle geçişi gözlenmiştir.

Mikromercekle etkisine uğramış tayf ile yıldız atmosferleri hakkında ne öğrenilebileceği tam olarak belirgin değildir. Genel olarak modellemeler, noktasal kütle kostik geçişi üzerine odaklanmıştır. Fakat gelecekte tayfsal olarak gözlenebilecek olanların çoğu hassasiyet düzeyi olarak tercihen çift kostik etkileşimlerdir.

Bunların yanısıra kostik geçişi sırasında alınan tayflarda yıldızın dönmesi (Gould 1997, Mao & Gould 1994) ve polarizasyonunun (Simmons, Willis & Newsam (1995)) ölçülebileceği öne sürülmüştür. Son olarak Igance & Hendery (1999) kostik geçişi sırasında leke gözlemlerini araştırmışlardır.

### 4 – Sonuç

Mikromercekle etkisi önümüzdeki yıllar için astrofizik araştırmalarında önemli bir araç olarak karşımıza çıkmaktadır. Yıldız kütle fonksiyonu (karanlık cisimler, BD, WD, NS, BH) ölçülmesinde mikromercekle etkisinin kullanımı problemi teorik olarak çözülmüştür. Bu ölçümleri gerçekleştirebilecek olan uygulama aracı SIM (Space Interferometry Mission) yapım halinde olup, 2009 yılında uzaya yollanması hedeflenmektedir. 10 metre taban açıklığına sahip optik bir Michelson interferometresi olarak tasarlanan bir düzeneğe sahiptir. İşletim süresi 5 yıl olacak olan SIM geniş açı astrometrisi için 4  $\mu$ as; dar açı astrometrisi için ise 1 $\mu$ as'lik hassasiyetle 20<sup>m</sup> 'e kadar ölçüm yapabilecektir. Aynı

zamanda SIM'in yakın yıldızlara ait ölçümleri yıldız modellerinin kesinliği konusunda bir test imkanı da sunacaktır.

Tüm bunlar önümüzdeki on yıl içinde gerçekleşecektir, fakat mikromercek olayları yıldız astrofiziği üzerindeki etkisini şimdiden göstermeye başlamıştır. Önemli sayıda çift etkileşim olayı gözlenmiş ve bunlar şişkin bölgedeki yıldızların kütle dağılımının belirlenmesinde kullanılmıştır.

Bugüne kadar mikromercek etkisi kullanılarak;

- Dört kenar kararması ölçümü yapılmıştır. Bunlardan biri çok kesin olup diğer bir tanesi başka bir gökadede yer alan metalce zayıf bir A tipi bir yıldızla ait olan ölçümdür.
- Çok yakın zamanda mikromercek araştırma gruplarının işbirliği sonucunda Güneş'ten başka bir yıldızın uzayda çözümlenmiş tayfsal ölçümleri yapılmıştır.

On yıl önce sadece karanlık madde araştırmaları için düşünülen bir alandan yola çıkarak yıldız astrofiziği ve gökada yapısına yönelik yöntemler, veri hassasiyetini ve modellemeleri değiştirecek etkileyici gelişmelerdir.

## 5 – Kaynaklar

- Alard, C., Mao, S., Guibert, J. 1995, A&A, 300, L17
- Albrow, M., Beaulieu, J.-P., Birch, P. et al. 1996, in: Variable Stars and the Astrophysical Returns of Microlensing Surveys, Proc. 12<sup>th</sup> IAP Conf., eds. R. Ferlet, J.-P. Maillard & B. Raban
- Albrow, M., et al. 1999a, APJ, 522, 1011
- Albrow, M., et al. 1999c, APJ, 522, 1022
- Albrow, M., et al. 2000, ApJ, 534, 894
- Albrow, M., et al. 2001a, ApJ, 549, 759
- Albrow, M., et al. 2001b, ApJ, 550, L173
- Alcock, C., Akerlof, C.W., Allsman, R.A. et al. 1993, Nat, 365, 621
- Alcock, C., Allsman, R., Axelrod, T. et al. 1995a, Phys. Rev. Lett., 74, 2867
- Alcock, C., Allsman, R.A., Alves, D. et al. 1995b, ApJ, 454, L125
- Alcock, C., Allsman, R.A., Axelrod, T.S. et al. 1996, ApJ, 461, 84
- Alcock, C., Allsman, R.A., Alves, D. et al. 1997, ApJ, 479, 119
- Aubourg, E., Baeyre, P., Brehin, P. et al. 1993, Nat, 365, 623
- Bartelmann, M., Narayan, R. 1995a, ApJ, 451, 60
- Bartelmann, M., Narayan, R. 1995b, *Dark Matter*, AIP Conf. Proc. 336, eds. , 1
- S.S. Holt & C.L. Bennett (New York: AIP Press)
- Bartelmann, M., Weiss, A. 1994, A&A, 287, 1
- Bagdanov, M.B., & Cherepashchuk, A.M. 1995, Astron. Re., 39, 779

- Bryce, H.M., M.A. 2001, in ASP Conf. Ser., Microlensing 2000: A New Era in Microlensing Astrophysics, ed. J. W. Menzies & P.D. Sackett (San Francisco: ASP), in press (astro-ph/0004250)
- Burns, D., et al. 1997, MNRAS, 209, L11
- Dyson, F. W., Eddington, A.S., & Davidson, C.R. 1920, Mem. R. Astron. Soc., 62, 291
- Eddington, A.S. 1920, Space, Time and Gravitation (Cambridge: University Press)
- Einstein, A. 1911, Annalen der Physik, 35, 898
- Einstein, A. 1915, Sitzungsber. Preuß. Akad. Wissensch., erster Halbband, p. 831 Einstein, A. 1936, Sci, 84, 506
- Gould, A., Loeb, A. 1992, ApJ, 396, 104
- Gould, A. 1994b, ApJ, 421, L75
- Gould, A. 1996, ApJ, 470, 201
- Gould, A. 1997, ApJ, 483, 98
- Gould, A., 2001, PASP, 113, 903 G
- Jaroszylski, M., Park, C., Paczyński, B., Goti, J.R. 1990, ApJ, 365, 22
- Mao, S., Paczyński, B. 1991, ApJ, 374, L37
- Mao, S., Kochanek, C.S. 1994, MNRAS, 268, 569
- Mao, S., Paczyński, B. 1996, ApJ, 473, 57
- Mao, D., Rix, H.-W. 1993, ApJ, 416, 425
- Mao, D., Rix, H.-W., Ga1-Yam, A., Gould, A. 1997, ApJ, 486, 75
- Paczynski, B. 1986b, ApJ, 304, 1
- Paczynski, B. 1987, Nat, 325, 572
- Paczynski, B. 1991, ApJ, 371, L63
- Paczynski, B. 1996, ARA&A, 34, 419 S
- Paczynski, B., Sianek, K.Z., Udalski, A., Szymm1ski, M., Kaluzny, J., Kubiak, M., Mateo, M., Krzeminski, W. 1994, ApJ, 435, L13
- Refsdal, S. 1964, MNRAS, 128, 307
- Refsdal, S. 1966a, MNRAS, 132, 101
- Refsdal, S. 1966b, MNRAS, 134, 315
- Refsdal, S., Surdej, J. 1994, Rep. Progr. Phys., 57, 117
- Shapiro, I.I. 1964, Phys. Rev. Lett., 13, 789
- Udalski, A., Szymanski, M., Kaluzny, J., Kubiak, M., Mateo, M. 1992, Acta Astron., 42, 253
- Udalski, A., Szymanski, M., Kaluzny, J., Kubiak, M., Krzemmski, W. et al. 1993, Acta Astron. 43, 289
- Udalski, A., Szymanski, M., M80, S., Di Stefano, R., Kaluzny, J., Kubiak, M., Mateo, M., Krzemmski, W. 1994, ApJ, 436, L103
- Witt, H.J., Mao, S. 1994, ApJ, 430, 505
- Zwicky, F. 1937a, Phys. Rev. Lett., 51, 290
- Zwicky, F. 1937b, Phys. Rev. Lett., 51, 679