

Kütle Çekim Mercekleri Olarak Galaksi Kümeleri

- Galaksi, galaksi kümesi veya karadelik gibi büyük kütleli cisimler kütleleri dolayısıyla kendilerine göre arka planda olan yıldız ya da kuasar gibi cisimlerin ışığını saptırır. Bu olaya **kütle çekim kırılması** denir. **Einstein'ın genel görelilik teorisinin öngörülerinden biridir.**
- **Uzay-zamanın bozulmasından** kaynaklanan görsel bir etkidir.
- Işığın takip ettiği yol düz bir doğrultuda devam etmez.

- Newton teorisinde, ışığın c hızıyla yol alan parçacıklardan oluştuğu düşünülmektedir.
- Bu tür parçacıklar yerçekimini herhangi bir cisim gibi hissedecektir.
- Işık, M kütesine sahip bir cismin R kadar uzağından geçerse toplam sapma açısı radyan biriminde $\alpha = \frac{2GM}{c^2R}$ olacaktır. Burada c ışık hızı, G kütle çekim sabitidir.
- Bu Newtonian ifade ilk kez 1804'te Soldner tarafından elde edilmiştir.
- Soldner, Güneşin kenarına yakın olan bir ışık ışınının $\alpha = 0.84$ yay saniyelik bir açıyla kırıldığını tespit etmiştir.
- 1911'de Einstein yine Newton fiziği kullanarak aynı sonuca ulaşmıştır.

$$\alpha = \frac{2GM_{\odot}}{c^2R_{\odot}}$$

- 1915'te genel görelilik kuramının ortaya çıkmasından sonra uzay-zaman bükülmesine bağlı olarak M noktasal kütesi tarafından meydana gelen ışık sapmasının 2 x Newtonian olduğu ortaya çıkmıştır.

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2R}$$

- Buna göre, Einstein Güneşin kütle ve yarıçapını kullanarak Güneşin neden olduğu kırılmayı;

$$\alpha = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} = 1.74 \text{ yay saniyesi}$$

olarak hesaplamıştır.

- 1919 yılında Eddington Güneş tutulması sırasında bu değeri gözlemsel olarak onaylamıştır.

- Çekimsel mercek etkisinin oluşabilmesi için ışınların, kütleli cismin ne kadar uzağından geçmesi gerektiğini gösteren yarıçap **Schwarchild Yarıçapı (R_s)**'dir.
- Bu yarıçap $\frac{2GM}{c^2}$ ile verilmektedir.
- Öyleyse, α açısının R_s cinsinden değeri $\alpha = \frac{2R_s}{R}$ olarak verilir.
- **Çekimsel mercek etkisi**; gözlemci, mercek etkisi yapan cisim ve gözlenecek kaynağın hemen hemen aynı hizada sıralanmasını gerektirmektedir.
- Işığı kırarak kadar büyüklüğe sahip kütle, **çekimsel mercek** adını alır.

- Kütle çekimsel mercekler bilinen merceklerden tamamıyla farklıdır. Örneęin ince kenarlı bir mercekte ışınlar asal eksenenden uzaklaştıkça kırılma artar. **Işığın çekimsel merceğe olan uzaklığı azaldıkça ışınların kırılma açısı büyür.**
- Çekimsel mercek etkisinin bir diğer özelliği de **bir objenin birden fazla görüntüsünün oluşmasıdır.** nk ışık farklı yollar kat ederek gözlemciye ulaşır. İnce kenarlı bir mercekte ise cismin bir görüntüsü oluşur.
- **Burada kat edilen bir yol diğerinden daha kısadır.** Dolayısıyla, cisim kısa yoldan gelen ışıkta daha yakın ve daha parlak görünür.

Çekimsel mercek etkisinin ortaya çıkarttığı olgular;

- Einstein Halkası
 - Çoklu görüntüler
 - Dev parlak yaylar ve arcletler
 - Kuasar mikro-mercek etkisi
 - Galaktik mikro-mercek etkisi
 - Küçük elipsler
- Güçlü kütle çekim kırılması
- Mikrolensing
- Zayıf kütle çekim kırılması

Mercek temelde iki etki üretmektedir. İlki, ışık ışınlarını saptırması; **ikincisi** ise bir kütle çekim zaman gecikmesine neden olmasıdır. Merceğin düzenine bağlı olarak, gözlemci güçlü bir şekilde bozulmuş çoklu görüntüler (yaylar), eliptik bir şekle sahip olan bozulmuş tekli görüntüler (yaysılar) ve zayıf bir şekilde bozularak uzamış ve neredeyse görünmeyen görüntüler (zayıf shear düzeni) görmektedir.

Bu olgular arasındaki ayırım kaynak, mercek ve gözlemcinin göreceli konumlarına bağlıdır.

Kuazar Mikromercek Etkisi

- Mercek etkisine uğrayan kuasardan gelen ışık demeti, aradaki galaksi tarafından bölünür.
- Galaksi merkezi ve kuasar görüntüsü arasındaki **tipik ayrılma 1 yay saniyesi** mertebesindedir.
- Yani, kuasardan gelen **ışık demeti galaksi doğrultusunda ve/veya galaksi halosu doğrultusundadır.**
- Galaksiler yıldızlardan ve galaksi haloları kompakt objelerden ve yıldızlardan oluşmaktadır.
- Bu yıldızlardan her biri kompakt mercek veya mikro mercek gibi davranırlar ve kaynağın bir yeni görüntüsünü oluştururlar.
- Mikro mercek etkisi gösteren şimdiye kadar ki en iyi örnek dörtlü kuazar Q2237+0305'dir
- **Einstein Haçı** denilen yapıyı oluşturmaktadır.

Kuvvetli Kütle Çekim Kırılması

- Bir galaksi kümesi tipik olarak büyük kütleyle sahip olduğu için, kümenin bir **kütle çekim merceği** (gravitational lens) gibi davranması ve arka planda duran cisimden gelen ışık ışınlarının yolunu bükmesi beklenmektedir.
- S konumundaki bir galaksiden gelen ışık ışınları kümenin yakınından geçerken saptırılır ve O'da bulunan gözlemci görüntüyü başka bir konumda görür.
- Görünür konumdaki bu değişikliğin yanı sıra, kütle çekim mercekleri arka plandaki galaksi **görüntüsünün bozulmasına** ve tipik olarak **birden fazla görüntü oluşmasına** neden olmaktadır.
- Bu etkiye **kuvvetli kütle çekim kırılması** (strong gravitational lensing) denmektedir.
- Kütle çekim mercekleri aynı zamanda uzaktaki cisimlerin **görünen parlaklıklarını arttırabilirler**. Kütle çekim kırılması, ışığı yoğunlaştırarak normalde görmek için çok sönük olan uzaktaki cisimlerin gözlenmesine izin verir.

Çoklu Görüntüler

- Güçlü kütle çekim kırılmasına ilişkin yapılan ilk gözlem ikili görüntüye sahip Q0957+561 kuazarına aittir.
- 6 yay saniyesi ayrıklığa sahip bir çift mavi cisim olarak gözlenmiştir.
- Peşpeşe yapılan tayfsal gözlemler sonucu iki cismin tayflarının tamamen aynı olduğu anlaşılmıştır.
- Bir başka gözlemde ise B bileşeninin neredeyse önünde parlak bir galaksi ve bunu çevreleyen bir kümenin bulunduğu anlaşılmıştır.
- Kuazar için kırmızıya kayma $z = 1.41$, küme için ise $z = 0.35$ 'tir.
- İki kuazar görüntüsü arasında 1.14 yıllık bir zaman gecikmesi vardır.

- Karakteristik zaman farkı, ışığın mercek görevi gören kütlenin Schwarzschild yarıçapından geçiş süresine bağlıdır.
- Bu fark;

$$\Delta t = \frac{2GM}{c^3}$$

ile hesaplanır.

- Ayrıca, görüntünün büyütmesi ise

$$\mu_{\pm} = \frac{u^2 + 2}{2u\sqrt{u^2 + 4}} \pm \frac{1}{2}$$

$$u = \beta/\theta_E$$

$$\mu = |\mu_+| + |\mu_-| = \frac{u^2 + 2}{2u\sqrt{u^2 + 4}}$$

- Kuvvetli kırılmaya bir örnek şekilde verilmiştir. CL 0024+1654 kümesinin mercek etkisi yaratması, daha uzaktaki bir galaksinin 5 görüntüsünün oluşmasına neden olmuştur. Bu galaksi görüntüleri uzamış mavi halkalar şeklinde biri görüntünün merkezine yakın diğer dördü ise kenarlarda olmak üzere şekilde görülmektedir.

- Çoklu görüntülerin tanımlanması;
 - optik spektroskopi,
 - çok renkli fotometri ya da
 - ortak morfolojik özelliklerkullanılarak yapılmaktadır.

Parlak Yaylar

Şekil XX: Abell 2218 en ünlü yay örneklerini içermektedir. Ön plandaki Abell 2218 kümesi arka plandaki galaksilerin görüntülerini bozarak belirgin eliptik yay şeklinde küme merkezi etrafında toplanmasına neden olmaktadır. Bu durum, kümenin büyük kütleli olması ve birçok arka plan galaksisiyle aynı doğrultuda olması nedeniyle olağanüstüdür.

- 1986 da, yüksek kırmızıya kayma değerine sahip iki kümede sıra dışı şekilde uzamış yay şekline benzer kaynaklar keşfedilmiştir.
- Bu kaynakların doğası ilk başlarda anlaşılammış ve *yaylar (arcs)* veya *dev parlak yaylar (giant luminous arcs)* olarak adlandırılmışlardır.
- Yayların kökenlerine ilişkin farklı hipotezler mevcuttur (bir patlamadan kaynaklanan şok cepheleri oldukları gibi)
- Tüm bu hipotezler, Abell 370 kümesindeki *yayın tayfının alınmasıyla* çürütülmüştür.
- Bu tayf, kaynağın kümeden *çok daha büyük bir kırmızıya kayma değerine* sahip olduğunu göstermiştir.
- Dolayısıyla, yayın kümenin *kütle çekim kırılma etkisine maruz kalan bir arka plan kaynağı* olduğu anlaşılmıştır.
- *Dev yaylar, zengin kümelerin arka plan galaksileri üzerindeki mercek etkisi nedeniyle* meydana gelmektedir. Bu kümeler, galaksilerin şekillerini büyük büyütmelemlerle kümenin merkezi etrafında uzun yaylar şeklinde bozarlar.

Şekil XX: **Solda** $z = 0.375$ olan A370 kümesinin HST görüntüsü verilmektedir. 20 yay saniyesi uzunluğundaki yay açıkça görülmektedir. Yay, iki parlak galaksi arasında kabaca orta noktada bulunan küme merkezine teğetsel olarak uzanmakta olup merkeze doğru kavislidir. **Sağda** $z = 0.33$ olan ise C12244-02 kümesinin VLT'deki ISAAC kamerasıyla alınan görüntüsüdür. Tayfsal analizler kaynak görüntüsünün kırmızıya kaymasının 2.24 olduğunu ortaya çıkartmıştır.

- Kütle çekim kırılmasının küme içinde yalnızca kütle dağılımına bağlı olması diğer yöntemlere göre bir avantaj sağlamaktadır.
- Yani, virializasyon ya da hidrostatik dengeyle ilgili yaklaşım yapılmak zorunda değildir.
- Kırılma, kütle çekim alanının direk bir sonucu olduğu, gaz ya da karanlık madde ayrımı olmaksızın küme içindeki tüm kütleyle duyarlıdır.

Zayıf Kütle Çekim Mercek Etkisi

- Kütle çekime bağlı olarak meydana gelen ışık sapması yalnızca ışık ışınlarını bir bütün olarak saptırmakla kalmaz aynı zamanda diferansiyel ışık sapması ile bunların boyut ve şekillerini de bozar.
- Bu diferansiyel ışık sapması, mercek etkisi olmadan kaynakların olması gerekenden daha parlak görünmesine yol açar.
- Devasa yay yapıları bu bozulmalara ve büyütmelelere iyi bir örnektir.
- Eğer bu tür sıra dışı bir yol ile dev parlak yaylar olarak görülecek şekilde bozulmuş bazı arka plan kaynakları varsa, **daha az şiddette bozulmuş ve çok daha fazla sayıda arka plan gökadasının da var olması** akla yatkın gelmektedir.
- Bunlar, tipik olarak, **küme merkezinden daha büyük bir açısal ayrıklıkta konumlanmışlardır** ki burada mercek etkisi parlak yayların bulunduğu konumdakinden daha zayıftır.

- Zayıf mercek etkisi, **ayrı ayrı ölçülemeyen ışık sapmalarıyla uğraşmaktadır**, fakat bunu sadece istatistiksel yolla yapmaktadır.
- “güçlü kırılmalar” çok seyrek görülen olaylardır. Öte yandan **zayıf kırılmalar daha yaygındır.**
- Her foton, yolu üzerindeki ya da yakınındaki maddelerin homojen olmayışından etkilendiğinden, ilke olarak evrendeki her bakış doğrultusu boyunca zayıf mercek etkisi görülür.
- Gözlem noktamız ve uzaktaki ışık kaynağı arasındaki herhangi bir tekdüze olmayan madde dağılımı, kaynakların ölçülebilir özelliklerini üç farklı yolla etkileyebilir:
- Kozmik bir nesnenin **şeklinde küçük bir deformasyona, parlaklığında küçük bir değişikliğe ya da konumunda küçük bir değişmeye sebep olabilir.**

- Bu etki **kozmetik budama** (cosmic shear) olarak bilinmektedir ve bir yüzme havuzunda yüzeydeki dalgalanmalar üzerinden havuzun tabanına bakmaya benzemektedir.
- Yüzme havuzu örneğinde, havuzun tabanındaki fayansların kare desenleri küçük bozulmaların kolayca görülmesini sağlamaktadır.
- Karo fayanslar, yüzeydeki dalgalar tarafından bozulur ki bu tip bozulma bir **budama** (shearing) olarak bilinir. *Kozmik budama* terimi de buradan gelmektedir.
- Ancak, gökyüzünde üzeri boyanmış uygun kare çizgiler yoktur. Bunun yerine, hassas araştırmalarla ortaya çıkarılan **çok uzak galaksiler kullanılabilir**: eğer yeteri kadar büyük bir uzaklığa bakılabilirse, gökyüzünün her bir küçük parçasında çok sayıda arka plan galaksisinin var olduğu görülür.

- Galaksi kümelerine uygulandığında, **zayıf kütle çekim kırılması** tekniği oldukça güçlüdür.
- Yalnızca **toplam küme kütlelerinin hesaplanmasına** izin vermekle kalmaz aynı zamanda da **kümedeki kütle dağılımının haritalandırılmasına** olanak sağlar.
- **Bozulmalar, tek bir galaksi görüntüsünde tanımlanamayacak kadar zayıftır.**
- Bunun sebebi, galaksilerin bünyesel ışık dağılımının dairesel olmamasıdır.
- Gözlenen görüntü şekli bünyesel şeklinin ve kütle çekim mercekle bozulmasının üst üste binmiş bir halidir.
- Galaksilerin bünyesel eliptiklikleri genel olarak kozmik budamadan oldukça genişler ve kırılma etkisinin ölçümünde bir tür gürültü gibi davranırlar.
- Ancak, ışık ışınlarının içinden geçtiği kütle çekim alanı benzer olduğu için komşu galaksi görüntülerinin bozulması da benzer olmalıdır. Böyle birçok galaksi görüntüsünün ortalaması alınarak, bozulma ölçülebilir.

Şekil: Zayıf kütle çekim kırılma etkisinin temeli bir simülasyonla gösterilmektedir. Kümedeki kütle çekim alanının tedirginlik bileşeninden dolayı arka plan galaksilerinin görüntülerinin biçimi bozulmakta ve galaksi görüntüleri yaylarda olduğu gibi ortalama olarak küme merkezine teğetsel olarak hizalanmaktadır. Galaksi görüntülerinin eliptikliklerinin yerel ortalaması alınarak, tedirginlik kütle çekim alanının yerel bir tahmini elde edilebilir (Çubukların yönü tedirginlik alanının yönlenmesini göstermektedir).