

## Galaksi Kümelerinin Kütleleri

- Bir kümenin kütlesi bilindiğinde **kümenin çevresi üzerindeki çekim etkisini** anlamak mümkün hale gelir.
- Dahası, bir kümenin kütlesinin bilinmesi **parlak ve karanlık maddenin görelî oranlarının tahmin edilmesine** de olanak sağlamaktadır.
- Ancak, kütle doğrudan ölçülebilen bir özellik değildir. Bunun yerine, tayf çizgilerinin dalgaboyları gibi gözlenebilir niceliklerin ölçümlerinden çıkarılması gerekmektedir.
- Galaksi kümelerinin kütlelerini tahmin etmek için **3 temel yöntem** vardır.
  1. **Optik: Virial Teoremi.** Denge varsayımı altında galaksi hız dağılımı,
  2. **X-ışınları: Hidrostatik denge varsayımı** altında sıcak gaz ısı ve dağılımı,
  3. **Kütle Çekim Kırılması: Arka plan galaksilerinin görüntülerindeki kütle çekim bozulmaları.**
- Bu yöntemler farklı fiziksel etkilere dayandırılmasına rağmen hepsi de küme kütleleri için oldukça benzer sonuçlar vermektedir.

## Hız Dağılımı Kullanarak Bir Kümenin Kütlesini Hesaplama

- **Virial Teoremi**, birbirine bağlı bir sistemde toplam kütle çekim potansiyel enerjisinin büyüklüğünün toplam kinetik enerjinin iki katına eşit olduğunu ifade eder.
- Buna göre, kinetik enerjiyle bağlantılı olan hızların dağılımı, kütle çekim potansiyel enerjisiyle bağlantılı olan sistemin toplam enerjisiyle ilişkilendirilebilir.
- Kümeler, yıldızlardan ziyade bir galaksiler bütünüdür, fakat kümelerde de aynı prensip geçerlidir.
- Yani, bir kümedeki bireysel galaksiler, kümedeki toplam kütlenin çekim alanı etkisi altında hareket etmektedirler. Bunun önemi, bir küme içindeki galaksilerin hızlarının gözlenebilir nicelikler olmasıdır. Bunlar Doppler kaymaları kullanılarak ölçülebilir ve bu durumda toplam küme kütlesinin hesaplanması için bir yöntem geliştirilebilir.
- Bu yöntem, galaksiler içindeki bireysel yıldızların hız dağılımları kullanılarak eliptik galaksilerin kütlelerinin hesap edilmesi için kullanılan yöntemle aynıdır ( $L \propto \sigma^\alpha$   $\alpha = 4$ ).

- Bu yöntemin kullanılabilmesi için sistemin virialize olması gereklidir.
- Yani, küme çökme ve genişleme durumunda değil kararlı halde olmalıdır ve galaksilerin hız dağılımları değişmemelidir.
- Küme ilk oluşmaya başladığı zamanlarda kararlı olma durumundan oldukça uzak olabilir. Kümedeki çarpışmalar ile bireysel galaksiler, gaz ve karanlık madde arasındaki diğer etkileşimler enerjilerin tekrar tekrar dağılmasına neden olmaktadır.
- Zaman içinde bu hareketler, daha fazla etkileşimin kinetik ve potansiyel enerji dağılımını değiştirmedeği kararlı bir duruma ulaşır.
- Bu durum, bir kümeyi *rahatlamış* (relaxed) veya *dinamik denge* (dynamic equilibrium) durumundadır şeklinde tanımlayarak ifade edilir.
- Özellikle yüksek derecede bir simetri gösteren kümelerin dengede olduğu düşünülmektedir. Düzensiz kümelerin bu duruma ulaşması oldukça düşük bir ihtimaldir ve bu kümelerde kütle hesaplaması için bu yöntemin kullanılması uygun olmayabilir.

**SORU:** Virial teoreminin uygulanması için hangi varsayımların yapılması gerekmektedir?

**CEVAP:** Sistemin virialize olması gerekmektedir. Yani kümenin kararlı bir durumda olması gerekir. Bu da kümenin ne genişliyor ne de çöküyor olduğu anlamına gelmektedir. Ayrıca galaksi hızlarının dağılımı değişmiyor olmalıdır.

- Eliptik galaksilerdeki yıldızların durumunda olduğu gibi kinetik enerji hız dağılımıyla karakterize edilebilir. Sonrasında ise kümenin kütlesi;

$$M = \frac{R_A(\Delta v)^2}{G}$$

denklemleriyle hesaplanır.

- Burada  $R_A$  Abell yarıçapı ve  $\Delta v$  küme üyelerinin bakış doğrultusundaki hızlarının dağılımıdır.
- Bu hesaplamada sadece kümeye ait galaksilerin kullanıldığına dikkat etmek önemli bir noktadır. Bakış doğrultusunda kümenin önüne veya arkasına düşen galaksiler tespit edilip hız dağılımı hesabından çıkarılır.
- Bir kümenin zenginliği ve hız dağılımı arasında zayıf bir ilişki bulunmaktadır. Buna göre zengin kümeler daha büyük hız dağılımlarına sahiptir.
- Zengin bir kümedeki galaksilerin tipik radyal hız dağılımı  $v = 400 - 1400$  km/s iken ortalama olarak  $v = 750$  km/s'dir.

**SORU:** Virgo kümesinde eliptik galaksiler 550 km/s 'lik hız dağılımı göstermektedir. Buna göre kümenin kütlesini Güneş kütlesi cinsinden hesaplayın..

- Fritz Zwicky, Coma kümesinin kütlelerini hesaplamak için ilk kez 1930 yılında virial teoremini kullanmıştır.
- Şaşırtıcı bir şekilde, küme kütlelerinin kümeyi oluşturan galaksilerin kütlelerinin toplamından çok daha fazla olduğunu bulmuştur. **Bu, Evren'deki karanlık maddenin varlığının tarihteki ilk göstergelerinden biridir.**
- Samanyolu galaksisi ve diğer galaksilerde karanlık maddenin varlığına ilişkin kanıtlar vardır.
- Galaksi kümelerinin kütleleriyle alakalı çalışmaların sonuçları, bir bütün olarak bir kümenin galaksileri çevreleyen çok büyük miktarlarda karanlık madde içermesi gerektiğini göstermektedir.
- Buradan, kümelerdeki parlak maddenin (sıcak x-ışını emisyon gazı da dahil olmak üzere) kütlelerinin yalnızca küçük bir bölümünü oluşturduğu sonucuna varılmaktadır.
- Toplam küme kütlelerinin geriye kalan %70 - %90'lık kısmını ise karanlık madde oluşturur.

## X-Işın Emisyonundan Bir Kümenin Kütlesini Hesaplama

- Galaksi kümeleri sadece tayfın görsel bölgesinde görünmez, aynı zamanda da güçlü X-ışını emisyonu üretirler.
- 1971 yılında Uhuru X-ışın uydusundan alınan sonuçlar, **galaksi kümelerinin gökyüzündeki en parlak X-ışın kaynakları arasında** olduğunu ortaya çıkartmıştır.
- Bu X-ışın emisyonu, küme içindeki **galaksiler arası boşluğa yayılmış çok miktardaki aşırı sıcak gazdan** (tipik olarak  $10^7$  ve  $10^8$  K arasında sıcaklıklara sahip) kaynaklanmaktadır.
- Kümelerin görsel bölge gözlemlerinde, gerçek küme üyelerini kümeye ait olmayan fakat bakış doğrultusundaki diğer galaksilerden ayırmada problem yaşanmaktadır.
- X-ışını gözlemleri için bu çok küçük bir sorundur, çünkü yanlışlıkla küme emisyonu olarak atfedilebilecek çok daha az sayıda X-ışını kaynağı mevcuttur.
- Diğer ekstragalaktik X-ışın emisyon kaynakları **normal ve aktif galaksilerdir**, ve bunlar galaksi kümelerinden oldukça farklıdır.
- Normal galaksiler tipik olarak X-ışın dalga-boyunda çok düşük ışınım gücüne sahiptirler.
- Parlak X-ışın kaynakları olabilen aktif galaksiler ise genellikle değişken olan kararsız (nokta kaynağa benzer) kaynaklardır.

Şekil 4.7: Hydra kümesinin x-ışın ve optik bölge görüntülerinin karşılaştırılması. (a) Hydra kümesinin x-ışın görüntüsü. Görüntüde, sıcaklığı  $3 \times 10^7$  K olan birkaç Mpc büyüklüğündeki geniş bir gaz bulutunun emisyonu gösterilmektedir. (b) Hydra kümesinin görsel dalgaboylarında alınan optik görüntüsü. X-ışın yayan sıcak bir gaz, kümedeki galaksiler arası uzayı doldurmaktadır.

- Bir küme, genişlemiş yaygın ve zamanla değişkenlik göstermeyen bir X-ışın emisyon bölgesi olarak görülmektedir (Şekil 4.7).

- Peki, X-ışınları nasıl üretilmektedir? Detaylı çalışmalar, kümelerden gelen X-ışınlarının **bazı salma çizgilerine sahip geniş süreklili bir tayf** şeklinde olduğunu ortaya koymuştur.
- Geniş süreklili bir tayf, **çok sıcak, iyonize olmuş bir gaz** ile ilişkili olan ve **ısısal frenleme ışınımı** (thermal bremsstrahlung) olarak bilinen bir mekanizmanın karakteristiğidir.

- Frenleme (bremsstrahlung) X-ışın emisyonunun varlığı, küme içinde çok miktarda sıcak iyonize gazın varlığının kanıtıdır.
- Bu gaz, az bir miktar ağır element içermekle birlikte büyük çoğunlukla hidrojen ve helyumdan oluşmaktadır.
- Şekil 4.7a'den görüleceği üzere, küme içi ortam da (**intracluster medium - ICM**) denilen bu gaz bölgesi galaksiler arasında bulunur ve kümede birkaç Mpc'lik bir yarıçapa yayılır.
- Bu, kümelerin genişlemiş, yaygın X-ışın emisyon alanları olarak gözükmesine neden olur.

# Thermal Bremsstrahlung

- **Isısal frenleme ışınımı**, tipik olarak yüksek sıcaklığa ve düşük yoğunluğa sahip plazmada meydana gelen bir X-ışın salma mekanizmasıdır.
- Serbest bir elektron gaz içindeki bir iyonun yakınından geçerken iyon tarafından yakalanmadan yönü değiştirilir (Şekil 4.8).
- Bu ivmelenmenin sonucu olarak, elektron bir foton kaybeder, aynı zamanda da buna karşılık gelen miktarda kinetik enerji kaybeder ve bir miktar yavaşlar.
- Bu şekilde üretilen X-ışınları *bremsstrahlung* olarak bilinir.
- Bu tür X-ışın emisyonu, elektronun iyon ile karşılaşmasının öncesinde ve sonrasında serbest olarak hareket etmesi nedeniyle **serbest-serbest salma** olarak adlandırılır.

Şekil 4.8: Bremsstrahlung (ısısal frenleme) emisyonu mekanizması.

- Bu yolla üretilen bir fotonun enerjisi  $\varepsilon_{ph}$ , elektronun ortalama ısısal enerjisine bağlıdır ve yaklaşık olarak;

$$\varepsilon_{ph} \sim kT$$

ile verilmektedir. Burada  $k$  Boltzman sabiti ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$ ) ve  $T$  ise gazın sıcaklığıdır. X-ışın astronomisinde fotonun enerjisi genel olarak kilo-elektronvolt ile ifade edilmektedir ( $1 \text{ keV} = 1.60 \times 10^{-16} \text{ J}$ ).

- **Kümelerdeki X-ışın emisyonu, 1 ile 10 keV aralığındadır ve bu da  $10^7$  ile  $10^8 \text{ K}$  aralığında bir sıcaklığa denk gelmektedir.**

- X-ışınları serbest elektronların ivmelenmesiyle üretildikleri için, bremsstrahlung emisyonunun tayfı düzgün bir sürekliliktir (Şekil 4.9).

- Bu tayf, elektronların bireysel atomlarla bağlı olmadığı tamamen iyonize olmuş bir gazın karakteristiğidir. Bu yüzden Bremsstrahlung tayfları, elektronların atomların enerji seviyeleri arasında geçiş yapmasıyla üretilen çizgi tayflarından farklıdır.

Şekil 4.9: Isısal Bremsstrahlung mekanizması tarafından salınan sıcak gaz nedeniyle meydana gelen tayfsal enerji dağılımı. Yüksek gaz sıcaklıkları için maksimumlar daha kısa dalgaboylarında oluşur.

- X-ışın görüntülerinden faydalanarak, tipik bir kümenin, içinde galaksiler bulunan geniş bir sıcak iyonize gaz bulutu olduğu görüşü ortaya çıkmıştır.
- Bir kümenin toplam gaz kütlesi Güneşin kütlesinden çok daha fazla olmasına rağmen kümedeki gaz geniş bir uzay hacmi içine yayılmıştır.
- Bu yüzden, küme içi ortamın tüm yoğunluğu bir yıldızı oluşturan maddenin yoğunluğundan birkaç on kat daha düşüktür, ve **bu da ortamdan X-ışınlarının kaçmasına izin verir.**
- Bu bağlamda, küme içi gaz Güneş'in koronasındaki seyrek gaza benzemektedir. Ancak, küme içi gazın Güneş koronasındaki gazdan birkaç on kat daha az yoğun olduğunu da belirtmek gerekmektedir.
- Bir kümenin kütlesini tayin ederken bu X-ışını emisyonunun nasıl kullanıldığını anlamak için küme içi gazın kendisini nasıl desteklediğini göz önünde bulundurmak gerekmektedir.
- Burada önemli bir nokta, bir yıldızın kararlılığını modellemek için kullanılan benzer **hidrostatik denge** kavramıdır.
- Küresel bir gaz bölgesi kendi çekim etkisi altında çökme eğiliminde olacaktır. Bir küme söz konusu olduğunda, kütle çekim alanı yalnız gaz kütlesi tarafından değil aynı zamanda da kümedeki karanlık maddenin kütlesi ile birlikte galaksilerin kütlesi tarafından üretilmektedir.

The gas in a cluster is trapped by the cluster's gravitational potential well. If the hot gas is supported by its own pressure against gravitational infall, it must obey the equation of hydrostatic equilibrium [2]. In most clusters, the intra-cluster gas appears to be in approximate hydrostatic equilibrium [3]. Assuming spherical symmetry,

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)\rho_{gas}(r)}{r^2}, \quad (3.1)$$

where  $P$  is the pressure of the gas,  $G$  is the gravitation constant,  $\rho$  is the density of the gas and  $M$  is the total mass inside the sphere of radius  $r$ .

The ideal gas law,  $PV = NkT$ , that can be written as,

$$P = \frac{\rho_{gas} k T}{\mu m_p}, \quad (3.2)$$

where  $k$  is the Boltzmann constant,  $T$  is the temperature of the gas,  $\mu$  is the mean molecular weight of the gas and  $m_p$  is the proton mass.

Combining equation 3.1 and equation 3.2, the total mass of the cluster as a function of the projected radius is,

$$M_T(r) = -\frac{kT(r)r}{G\mu m_p} \left( \frac{d \ln \rho_{gas}}{d \ln r} + \frac{d \ln T}{d \ln r} \right). \quad (3.3)$$

Assuming an isothermal, spherical gas cloud, with temperature  $T$ , equation 3.3 becomes,

$$M_T = -\frac{k T R}{G \mu m_p} \left( \frac{d \ln \rho_{gas}}{d \ln r} \right), \quad (3.4)$$

where  $R$  is the outer radius of the cluster and  $\mu$  is constant with radius, since the chemical composition of the gas is expected to be uniform throughout the cluster.

In this project we computed the total masses of four galaxy clusters by assuming spherical symmetry and hydrostatic equilibrium. The results are presented in Chapter 8.

- Küme içi ortam, bu kütle çekim çökmesine karşı gaz basıncı ile desteklenmektedir.
- Denge durumunda basınç, kümenin merkezinden olan uzaklıkla birlikte kütle çekim etkisini tam olarak dengeleyecek şekilde değişmektedir.
- Küme içi gazın sıcaklığı ve yoğunluğu X-ışın gözlemlerinden ölçülebilmektedir. Basınç ve sıcaklık bilindiğinde gaz basıncı da hesaplanabilmektedir.
- Kümenin toplam kütlesine ise basınç değişimine karşı çekim kuvvetini dengeleyen ilişki kullanılarak ulaşılmaktadır.
- X-ışın gözlemlerinden elde edilen küme kütleleri, galaksi içi gaz ve galaksiler hesaba katılarak elde edilen kütleden tipik olarak çok fazladır.
- **Belirli bir sıcaklık için, küme içi ortamdaki basınç değişimleri beklenenden yüksektir.** Bu durum kümedeki kütle çekim alanının, küme içi gaz ve galaksilerin kütlesi tarafından sağlanandan daha güçlü olduğunu göstermektedir. Bir kümenin toplam kütlesi tipik olarak  $10^{14}$  ile  $10^{15} M_{\odot}$  'dır.
- Bu, kümedeki galaksiler göz önüne alınarak hesaplanan kütleden çok daha fazladır, ki galaksiler toplam kütlelerin sadece %10'unu oluşturmaktadır. Dahası, X-ışın gözlemleri küme içi ortamdaki gaz kütesinden de bir tahmin yapmaya izin vermektedir ve bu tipik olarak bir kümenin toplam kütlelerinin %10'u ile %30'unu oluşturmaktadır. Geri kalan kütleli karanlık maddenin oluşturduğuna inanılmaktadır.

## Kütle-Çekimsel Kırılma Yoluyla Bir Kümenin Kütlesini Hesaplama

- Küme kütlelerini ölçmek için kullanılan farklı ve doğrudan bir yaklaşım, **kütle çekiminin ışık üzerinde sahip olduğu etkiye** dayanmaktadır.
- Einstein'ın genel görelilik teorisi bir dizi kestirim yapmaktadır. Bu kestirimlerden biri, kütle çekiminin gezegenler gibi cisimlerin yörüngelerini etkilemesinin yanı sıra ışığı da etkileyebilir olduğudur; şöyle ki, **ışığın yolu yeterince büyük bir cisme çok yakınlaşırsa bükülür.**
- Bu kestirim, Eddington tarafından Batı Afrika kıyısındaki Principe adasında 1919 yılında doğrulanmıştır. Tam Güneş tutulması esnasında yıldızların konumları ölçülerek, Güneş'in yüzeyine yakın olan yıldız ışığının bükülmesi hesaplanmış ve Einstein'ın teorisi ile uyumlu bir değişim olduğu bulunmuştur.

- Işık ışınlarının sapması, ışınları saptıran cismin kütlesi arttıkça artmaktadır.
- Bir galaksi kümesi tipik olarak yüksek kütleyle sahip olduğu için, kümenin bir **kütle çekim merceği** (gravitational lens) gibi davranması ve arka planda duran cisimden gelen ışık ışınlarının yolunu bükmesi beklenmektedir (Şekil 4.11).
- S konumundaki bir galaksiden gelen ışık ışınları kümenin yakınından geçerken saptırılır ve O'da bulunan gözlemci görüntüyü I konumunda görür.
- Görünür konumdaki bu değişikliğin yanı sıra, kütle çekim mercekleri arka plandaki galaksi görüntüsünün bozulmasına ve tipik olarak birden fazla görüntü oluşmasına neden olmaktadır.

Şekil 4.11: Kütle çekim kırılmasının şematik gösterimi. Arkaplan galaksisi S'den gelen ışık bir kümenin yakınından geçerken kırılır ve I'da görülecek şekilde bozulmaya uğrar. Kümedeki kütle dağılımına bağlı olarak farklı noktalarda birden fazla görüntü oluşabilir

- Kütle çekim kırılması, galaksi kümelerinin kütlelerinin ölçülmesi için nasıl kullanılmaktadır?
- Görülen bozulmanın miktarı bir şekilde mercekle olarak rol oynayan kümenin kütlesine bağlıdır.
- Mercek görevi gören kümenin kütle dağılımını tam olarak hesaplamak oldukça zordur. Tıpkı bir cam mercekte olduğu gibi, merceğin tam şekli görüntü bozulmasının ve büyütmesinin niteliğini belirlemektedir.
- CL 0024+1654 kümesinde olduğu gibi bozulmaların yapısı oldukça karmaşıktır ve daha çok bir cam şişenin altından uzak bir galaksiye bakmak gibidir.

Kütle çekim kırılmasının bir sonucu olarak ortaya çıkan çoklu görüntüler nadir olarak mercek etkisi gösteren kümenin merkezi etrafında neredeyse simetrik yaylar oluştururlar. Bu duruma özellikle Abell 2218 kümesi dikkat çeken bir örnek olarak gösterilebilir. (SORU)

- Şekil, bu tür bir kırılma durumunun şematik gösterimidir.
- Mercek etkisi gösteren kümedeki kütle dağılımı simetriktir ve merkezde toplanmıştır.
- Uzaktaki S galaksisi tam olarak merkez doğrultusunda konumlanmıştır.
- Kümenin her iki yanından geçen ışık ışınlarının yolları eşit olarak bozulmuş ve sonuç olarak Abell 2218'de görülenlere benzer şekilde simetrik halkalar veya yaylar oluşmuştur.
  
- Eğer ışık kaynağı ve merceğin hizalanması kusursuzsa ortaya çıkan görüntü, merceği saran eksiksiz bir halka şeklini alır.
- Böylesine bir halka **Einstein halkası** (Einstein ring) olarak bilinir. Şekilde gösterilen B 1938+666 gibi bu halkaların birçok örneği keşfedilmiştir.

Şekildeki kütle dağılımına bir nokta kütle olarak yaklaşım yapılırsa, uzaktaki cismin görüntüsü  $\theta_E$  açısal yarıçapına sahip tam bir halka olarak görünür ve bu açı;

$$\theta_E = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{D_{LS}}{D_L D_S}}$$

olarak verilir. Burada,  $D_S$  uzaktaki kaynak galaksi ile gözlemci arasındaki uzaklık,  $D_L$  kütle çekim merceğinin gözlemciden olan uzaklığı ve  $D_{LS}$  ise kütle çekim merceğinin kaynağa olan uzaklığıdır.

Yukarıdaki denklem kullanılarak mercek etkisi gösteren kümenin kütlesi “ $M$ ” hesaplanabilir. Benzer hesaplamalar, kırılmanın tam bir halka oluşturmadığı daha az simetrik durumlarda da kullanılabilir.

# GALAKSİ KÜMELERİ İÇİN ÖLÇEKLENDİRME İLİŞKİLERİ

## Kütle-Sıcaklık İlişkisi

Bir kümenin,

- uzaysal genişliği,
- galaksilerinin hız dağılımı,
- x-ışın gazının sıcaklığı ve
- parlaklığı

ne kadar fazlaysa, kümenin **o denli büyük kütleli** olması beklenmektedir.

- Aslında, teorik noktalardan yola çıkarak bu parametreler arasındaki ilişkilerin varlığı ortaya çıkarılabilmektedir.
- X-ışın sıcaklığı  $T$ ,

$$T \propto \frac{M}{r}$$

bağlanma enerjisi ile orantılı olması gereken gaz parçacığı başına düşen termal enerjiyi belirtmektedir.

- Bu ilişki virial teoremine dayandığı için,  $r$  değeri küme materyalinin kararlı halde olduğu (virialize) yarıçap olarak seçilmelidir.
- $r$  için bu değer **virial yarıçapı** ( $r_{vir}$ ) olarak adlandırılır.
- Küme oluşumu için yapılan teorik görüşlerden yola çıkarak **virial yarıçapı**, bir küre içinde kümenin ortalama kütle yoğunluğunun Evren'in  $\rho_{cr}$  kritik yoğunluğundan  $\Delta_c \approx 200$  kat daha fazla olduğu yarıçap olarak tanımlanmaktadır.
- $r_{vir}$  yarıçapı içinde kalan kütle;

$$M_{vir} = \frac{4\pi}{3} \Delta_c \rho_{cr} r_{vir}^3$$

ifadesine göre *virial kütlesi* ( $M_{vir}$ ) olarak adlandırılmaktadır. Yukarıdaki iki denklem birleştirilerek aşağıdaki denklem elde edilmektedir.

$$T \propto \frac{M_{vir}}{r_{vir}} \propto r_{vir}^2 \propto M_{vir}^{2/3}$$

Bu ilişki, sıcaklığı bilinen ve daha önce bahsedilmiş yöntemlerle kütlesi tespit edilmiş bir galaksi kümesi rneęi kullanılarak gözlemlerden test edilebilmektedir.

Geniş HIFLUGCS (The Highest X-ray FLUX Galaxy Cluster Sample -- ROSAT All-Sky Survey) rnekleminden alınan kümeler için kütleye karşılık sıcaklık grafiği Şekilde verilmiştir.

- Şekilde, ölçülen değerler açıkça çok kuvvetli bir ilişki göstermekte olup bu ilişki,  $M = AT^\alpha$  şeklindeki güç yasalarını tanımlayan en iyi fitlerle birlikte gösterilmektedir.
- İki parametrenin kesin değeri, küme örnekleminin seçimine bağlıdır. Şekildeki sağdaki panel özellikle galaksi gruplarının (düşük kütle ve sıcaklığa sahip kümeler), yüksek kütleli kümelere elde edilen güç yasası fitinin altında bulunduğunu göstermektedir. Eğer örneklem, kütlesi  $M \geq 5 \times 10^{13} M_\odot$  olan kümelerle sınırlandırılırsa, en iyi fit %10'dan biraz daha fazla hataya sahip;

$$M_{500} = 3.57 \times 10^{13} M_\odot \left( \frac{k_B T}{1 \text{ keV}} \right)^{1.58}$$

denklemlerle verilmektedir.

- Bu ilişki, teorik olarak  $M \propto T^{1.5}$  ilişkisinden elde edilen değere oldukça benzemektedir.
- Galaksi gruplarının örnekleme dahil edilmesi oldukça dik eğime sahip kütle-sıcaklık ilişkilerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu nedenle, bu grupların ölçekleme kavramına uymadığı sonucuna varılmaktadır.

## Kütle-Hız Dağılımı İlişkisi

- Bir kümedeki galaksilerin hız dağılımı kütle ile ilişkilendirilebilir.

$$M_{\text{vir}} = \frac{3r_{\text{vir}} \sigma_v^2}{G} \quad \text{and} \quad T \propto \sigma_v^2, \quad T \propto r_{\text{vir}}^2 \quad \text{thus} \quad M_{\text{vir}} \propto \sigma_v^3$$

olarak bulunmaktadır.

- Bu ilişki, kütlesi X-ışın yöntemiyle tayin edilmiş ve galaksilerinin hız dağılımı ölçülmüş olan kümeler kullanılarak test edilebilmektedir. Alternatif olarak,  $T \propto \sigma_v^2$  ilişkisi test edilebilir. Bu ilişkiler gözlenen kümeler için aslında tatmin edicidir.
- Ancak,  $M$  ve  $\sigma_v$  arasındaki ilişki  $M$  ve  $T$  arasındaki ilişki kadar sıkı değildir.
- Dahası bu ilişkiden oldukça sapan çok sayıda küme bulunmaktadır. Bu kümeler genellikle rahatlamamış olan kümelerdir.
- Kütle ve hız dağılımı arasındaki ölçeklendirme ilişkisi uygulanmak istenirse, bu aykırı kümeler tanımlanmalı ve temizlenmelidir.

## Kütle ve Işınım Gücü İlişkisi

- Bremsstrahlung yoluyla salınan toplam X-ışın ışıınım gücü gaz yoğunluğunun karesi ve gaz hacmiyle orantılıdır, dolayısıyla;

$$L_x \propto \rho_g^2 T^{1/2} r_{vir}^3 \propto \rho_g^2 T^{1/2} M_{vir}$$

şeklinde hareket etmelidir.

-  $f_g = M_g / M_{vir}$  kümenin toplam kütesine göre gaz kesrini göstermek üzere,  $\rho_g \sim M_g r_{vir}^{-3} = f_g M_{vir} r_{vir}^{-3}$  denklemlle gaz yoğunluğunu hesaplayarak ve  $M-T$  ilişkisini kullanarak;

$$L_x \propto f_g^2 M_{vir}^{4/3} \propto f_g^2 T^2$$

denkleml elde edilir.

- Ancak, bu ilişki M-T ilişkisine kıyasla açıkça daha fazla saçılma göstermektedir.
- Bu nedenle, galaksiler arası gazın sıcaklığı X-ışın ışıınım gücüne ya da kümedeki galaksilerin hız dağılımına kıyasla daha iyi bir kütle göstergesidir.