YILDIZLARIN UZAKLIKLARININ BELİRLENMESİ

1. TRİGONOMETRİK PARALAKS

Bir araba ile yolda giderken size yakın olan nesnelerin yanından, uzaktakilere nazaran daha hızlı geçtiğiniz hissine kapılırsınız. Örneğin, yolun hemen kenarındaki bir ağaç ve oldukça uzaktaki bir dağa bakarken, ağaç sanki yanımızdan hızla geçiyormuş, dağ ise hareket etmiyormuş gibi görülür (Şekil 1). Oysaki her iki nesne de hareketsiz durmaktadır. Peki bu nesnelerin yanından birbirinden farklı hızlarda geçtiğimizi hissetmemizin nedeni nedir?

Şekil 1. Bize yakın ve uzak olan bir cismin yanından geçerken, açıların değişimi

Soldaki şekilde gözlemciden ileriye çizilen doğru ile ağaca çizilen doğru arasındaki açı 10° dir. Dağa çizilen doğru ile ise 60° kadardır. Araç ileri doğru hareket ettiğinde ise, bu açılar büyür ve bir noktada ikisi de 90° olur. Şekillerden de görüldüğü gibi araç ilerledikçe açılardaki değişim ağaç için dağa göre daha hızlı olmaktadır. Ağaç ile dağ aynı doğrultularda oldukları halde açıların değişimindeki bu hız farkı, bizim ağacın yanından daha hızlı geçiyormuş gibi hissetmemizi sağlar. Açıların, cisimlerin uzaklıklarına göre böyle bir farklılık göstermesi, cisimlerin uzaklıklarını onların yanına gitmeden de ölçmemizi sağlayabilir.

Yanına gidemediğimiz, oldukça uzağımızda bulunan bir cismin bize olan uzaklığını nasıl hesaplayabiliriz? Bunu bir örnekle açıklayalım.

Şekil 2. Bir köprünün uzaklığının yanına gidilmeden ölçülmesi

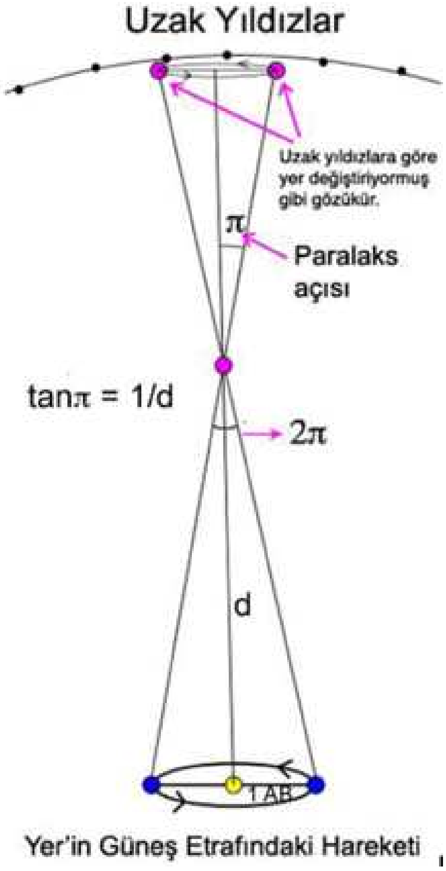
Köprünün karşısına geçmeden onun uzunluğunu hesaplayalım. 1 numaralı gözlemci köprünün hemen başında 2 numaralı gözlemci ise onun solunda başka bir yerden köprünün diğer ucuna bakıyor olsun. 1 numaralı gözlemciden köprünün diğer ucuna çizilen doğru ile, 2 numaralı gözlemciye çizilen doğru arasında şekilde görüldüğü gibi 90° lik bir açı olmalıdır. Bu durumda iki numaralı gözlemci bir kolunu 1 numaralı gözlemciye, diğerini ise köprünün diğer ucuna uzatırsa, kolları arasındaki açıyı kolaylıkla ölçebilir. Bu açı şekildeki ‘a’ açısına karşılık gelir. Üçgenin iç açıları toplamı 180° olduğundan, π açısı 90 – a olur. 1 numaralı gözlemci ile 2 numaralı gözlemci arasındaki uzaklık kolaylıkla ölçülebilir. Bu durumda bir kenarı ve bir açısı belli olan bir dik üçgen elde edilir. Trigonometriyi kullanarak

$$\tan \pi = \text{gözlemcilerin arasındaki uzaklık} / \text{köprünün uzunluğu}$$

olarak yazabiliriz. Böylece köprünün uzunluğunu direkt ölçmek yerine, karşıya geçmeye gerek kalmadan kolayca hesaplayabildik. Bu bağıntıyı kullanarak benzer şekilde, yanına gidemeyeceğimiz nesnelerin uzaklıklarını hesaplayabiliriz. Bu basit trigonometriyi uygulayabileceğimiz en iyi örneklerden biri yıldızlardır. Yıldızların uzaklıklarını doğrudan ölçmek imkansızdır. Çünkü bize en yakın yıldız bile 4 ışık yılı uzaklıkta olup bu mesafeyi kat etmek olanaksızdır. Ancak yukarıda söz ettiğimiz trigonometrik bağıntı, yıldızlar için de kullanılabilir.

Yer, Güneş etrafında yaklaşık 365 günlük dönemle dolanmaktadır. Yer'in Güneş etrafında yaptığı bu hareket nedeniyle yer, yıldızlara göre az da olsa yerini değiştirmektedir. Yukarıdaki köprü örneğinde birbirinden bağımsız 2 gözlemci kullanmıştık. Ancak yıldızlar çok uzakta olduğundan, açı ölçümünün hassas yapılabilmesi için bu iki gözlemcinin birbirinden örnekte verdiğimize nazaran çok daha uzakta olması gerekmektedir. Öyle ki gereken bu uzaklık Yer'in çapından çok daha büyüktür. Gözlemler sadece Yer'den ve Yer'in yörüngesindeki uydulardan yapabilmektedir. 2 gözlemci yerine, yerin Güneş etrafındaki hareketini kullanarak bu uzaklığı sağlayabiliriz.

Yer, Güneş'e ortalama 149.600.000 km uzaklıktadır. Bu uzaklık astronomide 1 AB (astronomik birim) olarak adlandırılır. Yer'in Güneş etrafında yılda 1 kere dolandığını biliyoruz. Yer, Güneş etrafında dolandığı bu yörüngede herhangi bir konumundayken, 6 ay sonra bulunduğu yerin Güneş'e göre tam zıt konumuna gelir. Yer'in bu iki konumu arasındaki uzaklık $2 \times 149.600.000$ km, yani 2 AB kadardır. Böylece biz bir yıldızın 6 ay aralıkla 2 görüntüsünü alırsak, Dünya'nın dolanma hareketinden dolayı, yıldızın yerini değiştirdiğini farkederiz. Yukarıda köprünün uzunluğunu hesaplarken iki gözlemciye gerek duymuştuk. Aralarında belli bir mesafe bulunan bu iki gözlemci köprünün diğer ucuna bakarak, onun uzaklığını hesaplıyordu. Biz de bir yıldızı 6 ay aralıkla 2 kere gözleyerek aslında, aralarında 2 AB uzaklık bulunan 2 gözlemci elde ettik. Şimdi bunu şekil üzerinde gösterelim:



Şekil 3. Paralaktik kayma

İlk verdiğimiz örnekte bir araba ile bir ağacın yanından geçerken, ağacın uzaktaki bir dağa göre sanki daha hızlı hareket ediyor gibi göründüğünü, dağın ise neredeyse hareketsiz gibi durduğundan söz etmiştik. Benzer etki yıldızlar için de söz konusudur. Yer yörüngesi üzerinde 6 ay yer değiştirdiğinde, yakın bir yıldız uzak yıldızlara nazaran konumunu daha çok değiştiriyor gibi gözükecektir. Burada yakın yıldızı örnekteki ağaca, uzak yıldızları ise dağa benzetebiliriz.

Köprü örneğine geri dönersek, benzer trigonometrinin yıldızlar için de kullanılabildiğini görürüz. Şekil 3'ü köprü örneğindeki resim ile karşılaştırdığımızda resimdeki 1 numaralı gözlemci Güneş'in olduğu yere, 2 numaralı gözlemci ise Güneş'in solunda yer alan Dünya'nın bulunduğu yere denk gelmektedir. Köprünün uzunluğu ise yıldızın Güneş'e olan uzaklığıdır. Tek fark, açıların köprü örneğindeki gibi direkt olarak ölçülememesidir. Bunun yerine yıldızın uzak yıldızlara nazaran gökyüzünde ne kadar yer değiştirdiği ölçülür.

Ölçülen bu açıya paralaks açısı denir. Başka bir değişle paralaks, bir gök cisminden yer ve Güneş'i gören açıdır. Şekilde π açısının, köprü örneğindeki π açısı ile benzer olduğu da gösterilmiştir.

Yıldızın Güneş'e olan uzaklığı d olmak üzere trigonometriden,

$$\tan \pi = 1\ (AB) / d\ (AB)$$

olarak yazılır. Bu formüldeki değerler AB cinsindendir. Dolayısıyla yıldızın uzaklığı da AB cinsinden bulunacaktır. Eğer yıldızın km cinsinden uzaklığını bulmak istersek, 1 sayısı yerine 1 AB'nin karşılığı olan 149.600.000 km değerini yazmak yeterlidir.

Küçük açılar yaklaşımını kullanarak 'tan' fonksiyonunu formülden çıkartmamız mümkündür. Bu yaklaşıma göre küçük bir açının radyan değeri, açının tanjant değerine eşittir. Böylece biz paralaks (π) açısını radyan cinsinden yazarsak formülü

$$\pi \text{ (rad)} = 1 \text{ (AB)} / d \text{ (AB)}$$

olarak yeniden yazabiliriz. Buradan yıldızın uzaklığı,

$$d \text{ (AB)} = 1 / \pi \text{ (rad)}$$

olarak bulunur. Paralaks (π) açısı çok küçük bir değer olduğundan yay saniyesi olarak verilir. Derece, yay dakikası ve yay saniyesi arasındaki bağıntı aşağıdaki gibidir:

$$1° = 60 \text{ yay dk veya } 60'$$

$$1' = 60 \text{ yay sn veya } 60''$$

böylece,

$$1° = 3600'' \text{ dir.}$$

Trigonometride 360 derece 2π radyandır (burada kullanılan π ifadesi matematiksel sabit olup paralaks açısı değildir). Böylece 1° = 2π / 360 radyan olarak bulunur. Bu ifadeyi 1 yay saniyesi için yazmak istersek:

$$1'' = 2\pi / (360 \times 3600) \text{ radyan}$$

olur. Formüldeki hesaplamalar yapıldığında,

$$1 \text{ rad} = 206265''$$

olduğu görülebilir. Paralaks açısı gözlemlerden yay saniyesi olarak elde edildiğinden son elde ettiğimiz d (AB) = 1 / π (rad) formülünü düzenleyerek,

$$d \text{ (AB)} = 206265 / \pi \text{ (yay.sn)}$$

olarak yazabiliriz. Yıldızın uzaklığını parsek biriminde yazmak istersek, 1 pc = 206265 AB olduğundan,

$$d\ (pc) = 1 / \pi\ (yay.sn)$$

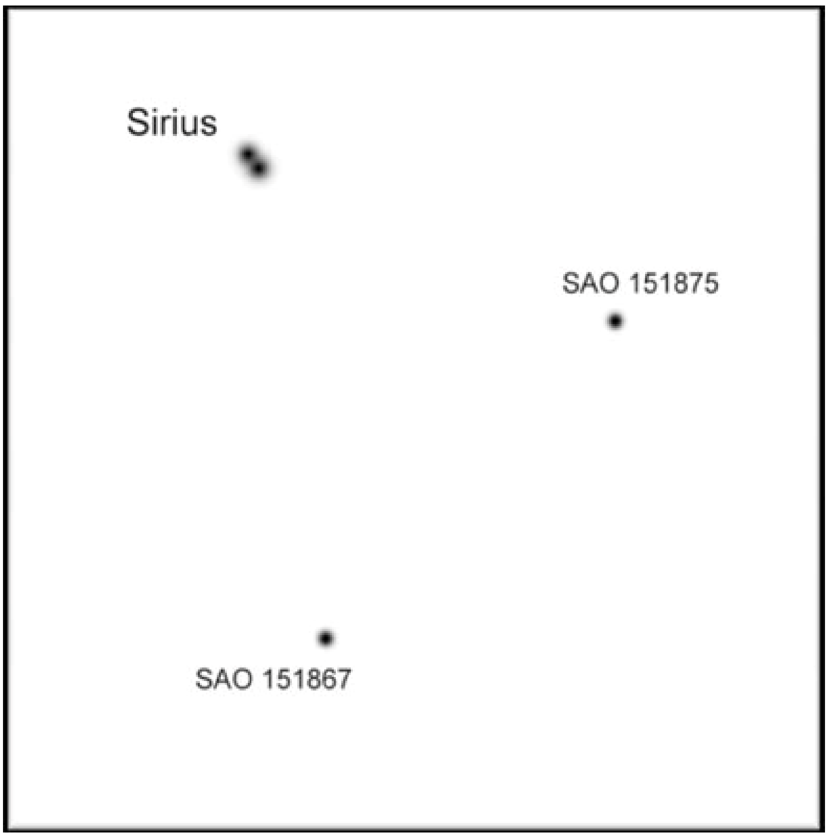
bağıntısını elde ederiz.

Böylece bir yıldızın 6 ay aralıklı iki gözlemini alarak, çok daha uzak olan yıldızlara nazaran kaç yay saniyesi yer değiştirdiğini hesaplayabilirsek, yıldızın uzaklığını bu formülden bulabiliriz.

Bu işlem için eskiden fotoğraf plakları kullanılırdı. Gökyüzünün 6 ay aralıklı iki görüntüsü teleskop yardımıyla fotoğraf plağının üzerine düşürülür ve bu iki fotoğraf karşılaştırılarak paralaksı bulunmak istenen yakın yıldızın ne kadar yer değiştirdiği bulunmaya çalışılırdı. Şimdi ise bu işlem için CCD'ler kullanılmaktadır (bkz. "Teleskoplar ve Dedektörler" bölümü). Bir örnek üzerinde bu işlemin nasıl yapıldığını anlamaya çalışalım. Şekil 4'te Sirius yıldızının 01.09.2007 ve 01.03.2008 tarihlerinde alınmış iki temsili CCD görüntüsü yer almaktadır.

Şekil 4. Sirius yıldızı ve iki referans yıldızının 6 aylık zaman farkı ile alınan örnek CCD görüntüsü

Alınan bu CCD görüntülerini öncelikle üst üste bindirmeliyiz. Bu iki görüntüde Sirius paralaksını hesaplayacağımız yakın yıldız, diğer iki yıldız ise Sirius'a göre en az 100 kat daha uzakta bulunan, yerin hareketi ile yerini değiştirmediğini kabul ettiğimiz iki referans yıldızıdır. Resimleri üst üste bindirirken dikkat etmemiz gereken iki husus vardır. Aynı teleskop, ekipman ve programla alınan iki görüntünün boyutu her ne kadar aynı da olsa, fotoğrafın yukarı-aşağı veya sağa-sola kayması muhtemeldir. Bu nedenle iki referans yıldızı tamamen üst üste gelecek şekilde çakıştırma yapılmalıdır. Eğer kullandığınız teleskop montajı ekvator koordinat sistemini kullanmıyorsa (bkz. “Teleskoplar ve Dedektörler” bölümü) farklı tarihte alınmış bu görüntüler dönmüş olarak gözükecektir. Bunun nedeni Yer’in dolanmasına ve dönmesine bağlı olarak yıldızların göreli konumlarının farklı yönlere yönelmesidir. Buna en iyi örnek, büyük ayı takımyıldızıdır. Yıldızlar kutup yıldızının çevresinde dönüyorlar gibi gözüktüklerinden, büyük ayı takımyıldızındaki cezvenin sapı bir mevsimde yukarı konumda batarken, başka bir mevsimde yatay konumda batar (bkz. “Çıplak Gözle Gökyüzü” bölümü). Ekvator koordinat sistemini kullanan teleskoplarda iki fotoğrafın dönmüş olarak gözükmesi ihtimali, teleskobun montajının ne kadar hassas yapıldığına bağlıdır. Öteleme ve döndürme işlemlerinin yapılabilmesi için en iyi yol, referans yıldızlarını birebir üst üste çakıştırmaktır. Örneğimizdeki görüntüler çakıştırıldığında Şekil 5 elde edilir.



Şekil 5. Sirius yıldızı ve iki referans yıldızının 6 aylık zaman farkı ile alınan örnek CCD görüntülerinin üst üste bindirilmesi ile oluşturulan bileşke görüntü.

Bileşke görüntüden de görüleceği üzere Sirius yıldızı, hareket etmediğini varsaydığımız diğer iki referans yıldızına göre yer değiştirmiştir. Ağaç örneğini tekrar hatırlarsak, burada Sirius'u ağaç, referans yıldızlarını ise dağ gibi düşünebiliriz. Yıldızın bu görüntüde kaç piksel yer değiştirdiğini bulursak, plak eşeli yardımıyla gökyüzünde de ne kadar konum değiştirdiğini yay saniyesi cinsinden bulabiliriz.

Astronomide görüntü işleme programlarının bazıları, gerekli bilgiler girildiğinde yıldızın gökyüzünde ne kadar yer değiştirdiğini (paralaktik kaymasını) yay saniyesi olarak verebilmektedir (Örn. IRAF). Güvenilir değerlerin elde edilmesi için bu tür programların kullanılması önemlidir.

2. TAYFSAL PARALAKS

Tayfsal paralaksın, biraz önce sözünü ettiğimiz trigonometrik paralaks ile aslında bir benzerliği bulunmamaktadır. Birinde uzaklık, yıldızın Yer'e göre göreli hareket etmesinden bulunurken, bu yöntemde yıldızların tayfları kullanılmaktadır. Klasik bir uzaklık belirleme yöntemi olduğundan paralaks olarak isimlendirilmiştir. Bu yöntemde, tayf türü belli olan uzak bir yıldızın yakınımızda bulunan yıldızlarla benzer özelliklere sahip olduğu varsayımı yapılmaktadır.

Bu yaklaşım için HR Diyagramı kullanılmaktadır (Şekil 5). Diyagramda görüldüğü üzere anakol, sınırlı bir genişliğe sahiptir. Eğer bir anakol yıldızının tayfından yıldızın tayf türü belilenebilirse, bu tayf türüne karşılık gelen Mutlak Parlaklık (veya toplam ışınım gücü) değeri bu diyagramdan bulunabilir.

Anakol yıldızları için Tayf Türü – Mutlak Parlaklık arasında sayısız kalibrasyon mevcuttur. Bazı bilim adamları aynı ilişkiyi dev yıldızlar için de vermektedir. Mikami (1978) ve Chalonge & Divan (1977) tarafından verilen kalibrasyonlar Tablo 1'de verilmiştir. Böylece yıldızların tayflarından (Şekil 6) tespit ettiğimiz tayf türü ile bu ve benzer kalibrasyonlar kullanarak, yıldızın mutlak parlaklığını (veya toplam ışınım gücünü) elde edebiliriz.

Elde ettiğiğimiz bu mutlak parlaklıktan yıldızın ışınım gücünü elde etmek için Pogson formülünü ve akı ifadelerini kullanmak yeterli olmaktadır. Pogson formülünü aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$m_1 - m_2 = -2.5\log 10(F_1 / F_2)$$

Burada 1. ve 2. yıldızın akıları oranları aşağıdaki gibidir:

$$F_1/F_2 = \left(\frac{L}{4\pi d_1^2}\right)\left(\frac{4\pi d_2^2}{L}\right)$$

Mutlak parlaklık, yıldıza 10 pc uzaklıktaki parlaklığı olduğundan, Pogson formülü düzenlenirse,

$$m - M = 5\log 10(d / 10\text{pc})$$

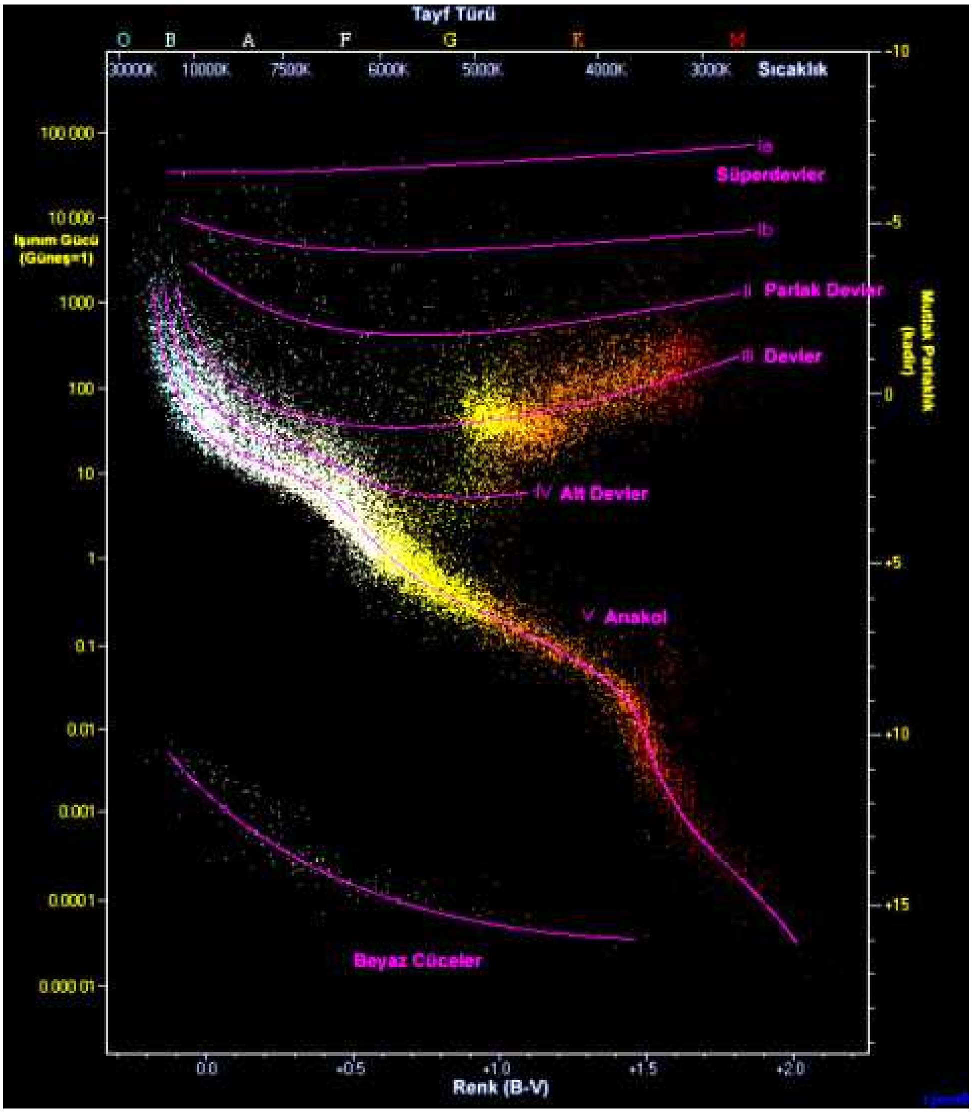
veya

$$m - M = -5 + 5\log d$$

elde edilir. Burada m − M ifadesi uzklık modülü olarak adlandırılır. Buradan d uzaklığı çekilirse, μ uzaklık modülü olmak üzere,

$$d = 10^{0.2(m - M + 5)} = 10^{0.2\mu + 1}$$

eşitliğini yazabiliriz.



Şekil 5. HR Diyagramı

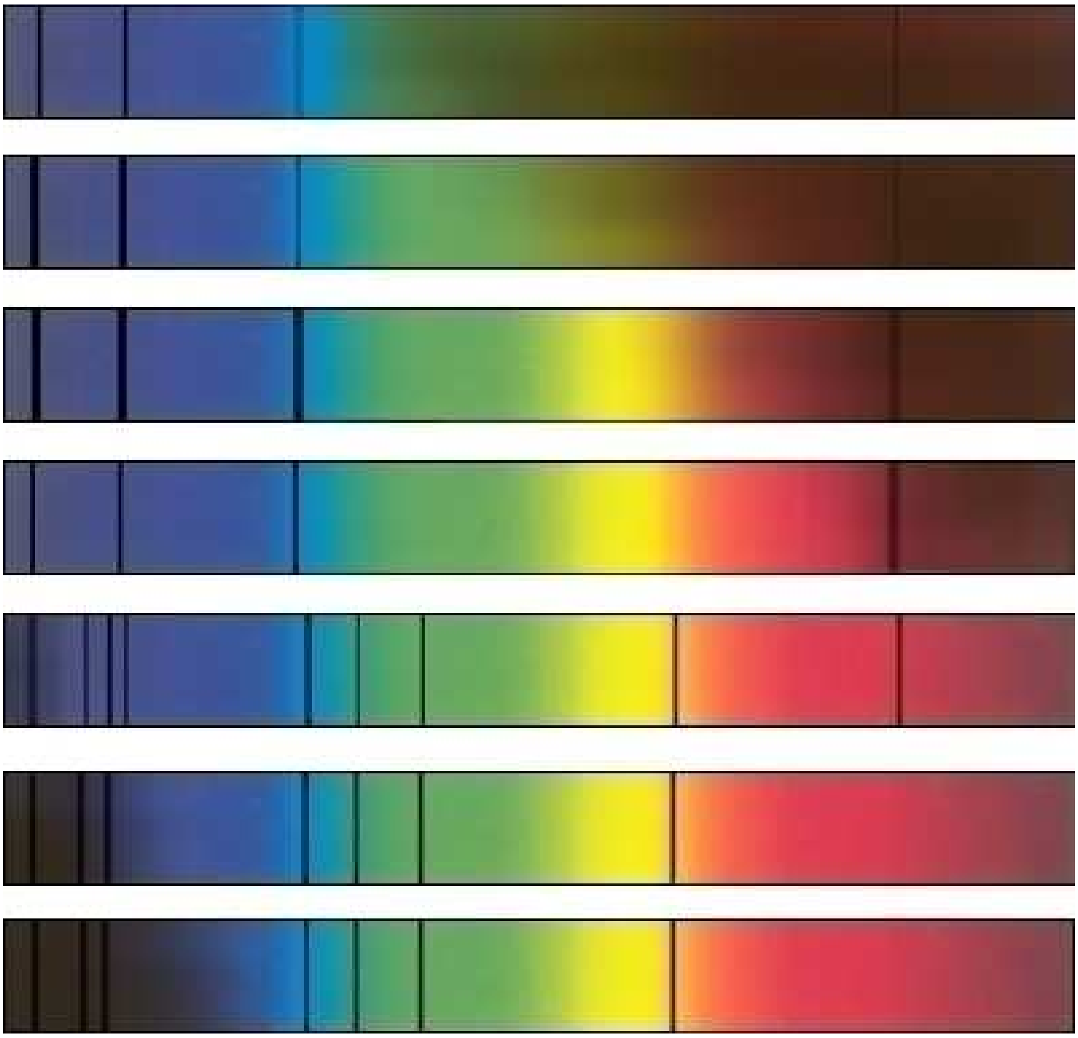
Tablo 1. Tayf türü – mutlak parlaklık kalibrasyonları

Tayf Türü (Işınım Sınıfı: V)	**Mutlak Parlaklık** (Işınım Sınıfı: V)	**Tayf Türü** (Işınım Sınıfı: III)	**Mutlak Parlaklık** (Işınım Sınıfı: III)
B5	-0.9	B5	-1.7
B6	-0.7	B6	-1.5
B7	-0.5	B7	-1.4
B8	-0.1	B8	-1.2
B9	0.3	B9	-0.9
B9.5	0.6	B9.5	-0.7
A0	0.8	A0	-0.4
A1	0.9	A1	-0.2
A2	1	A2	0.1
A3	1.2	A3	0.3
A4	1.4	A4	0.6
A5	1.8	A5	0.9
A6	2		
A7	2.1	A7	1.1
A8	2.2		
A9	2.3	A9	1.6
F0	2.7	F0	2.2
F1	2.9	F1	2.5
F2	3.3	F2	2.7
F3	3.5		1.4
F4	3.6		
F5	3.8		
F9	3.9		
G1	4.5		
G3	4.7	G4	0.5
G5	5	G7	0.6
G7	5.3	G8	0.2
G9	5.7	G9	0
K0	5.8	K0	0.1
K2	6.2	K2	0.3
K4	6.9	K4	-0.6

2.1 Tayfsal Paralaksın Limitleri

Tayfsal paralaks sadece 10 kpc uzaklığa kadar yeterli doğrulukta uzaklıklar verebilir. Bunun nedeni, gözlemci ile yıldız arasındaki maddenin cismi sönükleştirmesinden dolayı, belli uzaklıktan sonra yıldızların tayflarının alınmasının zorlaşmasıdır.

Yıldızın tayfı alınıp tayf türü belirlenmiş olsa bile, bu tayf türüne karşılık gelen ışınım gücünün tespitinde de bir yaklaşıklık söz konusudur. Çünkü aynı tayf türünden 2 yıldızın, ikisi de anakolda olsa dahi, ışınım güçleri farklı olabilmektedir.



Şekil 6. Yukarıdan aşağıya doğru O, B, A, F, G, K ve M tayf türünden yıldızların tayfları.