

Optik CCD Görüntüleme ve Temel Fotometri Teknikleri

Şölen BALMAN

Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Fen-Edebiyat Fakültesi, Fizik Bölümü, ANKARA
e-mail: solen@astroa.physics.metu.edu.tr

ÖZET: TÜBİTAK Ulusal Gözlemevi'nin (TUG) yakında işler duruma gelmesi ile 1.5 m lik teleskopla bir süre çoğunlukla fotometrik gözlem yapılabilecektir. Bu bildirinin amacı CCD ile alınmış fotometrik verilerin nasıl indirgeneceğini ve gerekli yazılım programlarının nasıl çalıştığını kısaca anlatmaktır. Bununla beraber 1998 yılında 40 sm lik teleskopla alınmış ilk CCD gözlemlerinin analiz sonuçları da açıklanacaktır. Alınan sonuçlara göre 40 sm de kullanılan CCD ile 12.5-17.0 kadir yıldızların fotometrik gözlemleri yapılabilir. Son olarak fotometrik gözlem analizine örnek olarak klasik nova Cygni 1992'nin patlamasıyla oluşmuş bir bulutsunun Kitt Peak NOAO, USA'da alınmış CCD görüntülerinin analiz sonuçları gösterilecektir.

1. CCD Verilerinin Kalibrasyonu

CCD verilerinin kalibrasyonunu yapabilmek için verideki gürültüden kurtulmak gerekir. Gürültü kaynakları şöyle sınıflandırılabilir :

- 1) *Poisson değişimleri (Poisson Fluctuations):* Bunlar verideki doğal değişimlerdir ve olasılık dağılımıyla hesaplanabilir. Bunu veriden ayıklamaya gerek yoktur. Sonuçtaki hataya yansır.
- 2) *Kazanç değişimleri (Gain Variations):* Her CCD'nin bir kuantum verimliliği vardır. Bu vuran fotonlarla kaydedilen fotonların oranıdır. Kazanç değişimi bu kuantum verimliliğine bağlıdır. CCD'lerde pixelden pixele değişiklik gösterir.
- 3) *Kozmik ışın elektronları (Cosmic ray induced electrons):* Kozmik ışınların CCD'ye çarpmasıyla sıcak pixeller oluşur. Görüntüde çok parlak noktacıklar olarak göze çarparlar.
- 4) *CCD Okuma Gürültüsü (Read Noise):* Pixellerdeki foto-elektronlar okunurken elektronik sistem her pixelde bunların bir kısmını kaçıır. Pixelde artık olarak kalan foto-elektron sayısı okuma gürültüsüdür.
- 5) *Kara Gürültü (Dark Noise):* CCD'nin ısınması (operasyon sıcaklığının üstüne çıkması) ile pixellerde foto-elektronlar oluşmaya başlar. Bunlar vuran fotonlardan değil de ionizasyondan kaynaklanırlar.
- 6) *Sıfır Seviyesi (Bias Level):* Sistemin elektroniğinden kaynaklanır. CCD'nin veri almadığı halde kendi kendine bir foto-elektron tabanı yaratmasından dolayı oluşur.

CCD ile bir ışık kaynağını tespit edebilmek için Vuru-Gürültü (Signal-to-noise) oranını hesaplamak gerekir. Bu oranı sağlayabilecek

uzunlukta entegrasyon zamanına ihtiyaç olacaktır. Vuru-Gürültü oranı şöyle hesaplanabilir:

$$\frac{V}{G} = \frac{N_e}{\sqrt{N_e + n_{pix}(N_s + N_d + N_r^2)}}$$

Burada N_e toplam elektron sayısı (e/görüntü), N_s ve N_d gök tabanı ve kara gürültü sayılarını (e/pix/görüntü), N_r de okuma gürültüsü sayısını (e/pix/görüntü) göstermektedir. Bu sayılar ADU olarak da adlandırılırlar. Anologdan dijital çevirim yaparken belirli bir sayıda foto-elektron 1 ADU olarak alınır ve bu faktöre göre pixel sayıları belirlenir.

2. Ön İndirgeme İşlemleri

CCD verisinin fotometrik analizine geçmeden önce yukarıdaki gürültü kaynaklarından temizlenmesi gerekir. Bunun için şu ön indirgeme işlemleri uygulanmalıdır. İlk önce görüntüyü 2x2 bir matrix gibi düşünelim (G_{ij}). Buna benzer bir şekilde Sıfır görüntüsü (S_{ij}), Kara görüntü (K_{ij}) ve Düz alan (D_{ij}) olduğunu varsayalım. Sıfır ve Kara görüntü sıfır saniye de CCD herhangi bir kaynağa maruz bırakılmadan alınır. Düz alan (Flat Field) gözlem yapılmadan önce teleskop bir beyaz ışık kaynağına tutularak (kubbenin içinde) CCD ile alınmış görüntüdür. Düz alan her filtre için ayrı alınır ve pixelden pixele kazanç değişimlerini düzeltmek için kullanılır. Bu kısaca alet tepkisi (detector response) için veriyi düzeltmektir.

$$\begin{aligned} G'_{ij} &= G_{ij} - S_{ij} - (K_{ij} - S_{ij}) \\ D'_{ij} &= D_{ij} - S_{ij} / \langle D_{ij} - S_{ij} \rangle \\ G''_{ij} &= G'_{ij} / D'_{ij} \\ (G'''_{ij} &= G''_{ij} - G''_{kij}) \end{aligned}$$

D_{ij} birimlenmiş düz alan görüntüsüdür. Yapılacak işe göre bir boş gök görüntüsü de alınarak asıl görüntüden çıkarılabilir. İlk satırdaki ayıklama işlemine gerekirse sıfır kuşağı (overscan region) ve CCE (Yük Sayma Verimliliği) düzeltmeleri de eklenebilir (duruma göre bu düzeltmeler eklenebilir veya çıkartılabilir). Bunlar dışında CCD'lerde çıkabilecek belli başlı diğer problemler de şunlardır:

- 1) *Doyma (Saturation)*: Çok parlak kaynaklarda entegrasyon zamanına bağlı olarak pixellerde taşma meydana gelir. Yıldızın profili bozulur ve bir dikdörtgen haline gelir.
- 2) *Birikme (Pile-up)*: Bazen CCD'lerin kapasitesi belli bir sayı oranında (count rate) kaynakları kaydetmeye yetmez. Fotonların bazıları kaydedilemediğinden dolayı yıldız profili bozulur Gaussian profilinin tepesi çukurlaşmaya başlar.
- 3) *CCD'nin zaman içinde doğrusal olması (CCE; Yük sayma verimliliği)*: CCD'nin zamana bağlı olarak foton sayma oranı sabit olmalıdır. Bu zaman içinde değişirse yongada bir bozukluk var demektir. Bu uygun bir seri gözlemlerle anlaşılıp düzeltilebilir.
- 4) *Kozmik ışın vuran pixeller*: Bunlar parlak noktacıklar olarak görüntüde gözükürler ve analiz programlarındaki birtakım parametreleri ayarlayarak temizlenebilirler.
- 5) *Özürümlü sütun ve sıralar*: Bu her CCD yongasında görülebilir. Elektronik okuyucu kapasitörler çalışmadığında belirli bir sütun veya sırada foton kaydedilemez ve boş olarak görüntüye yansır.
- 6) *Gök ve aydınlık değişimleri (Sky and Illumination variations)*: Bu yıldızların kadirini belirlemeden çok saçık kaynakların görüntü analizlerinde önem kazanır. Bir boş gök görüntüsü alınarak düzeltilme yapılabilir.

Doymuş veya birikim olmuş kaynaklar için fotometri yapılamaz. CCD'nin doğrusal çalışmadığı durumlarda da bu kayıp oranının büyüklüğüne göre alanın fotometrisini yapmanın bir anlamı kalmaz.

3. Temel Fotometri (Işık Ölçüm) Teknikleri

3.1. Açıklık Fotometrisi (Aperture Photometry)

Seyrek alanlarda (görüntülerde) iyi işleyen bir tekniktir. Bunu uygulamak için iki önemli aşama vardır. Birincisi yıldızın görüntü merkezini bulma diğeri de tabanın belirlenmesidir. Gauss fonksiyonu uyumlayarak yada tahmini bir merkez bulup ağırlıklı iteleme yöntemiyle asıl yıldız merkezi bulunur.

Bu son yöntemde yıldız için bir merkez tahmin edilerek yıldızın içinde bulunduğu $2a \times 2a$ ($a = \text{FWHM}$ yarı çapı) bir kare alınır ve içindeki pixeller aşağıdaki gibi toplanır.

$$\rho(x_i) = \sum_j I_{ij} \quad \rho(y_j) = \sum_i I_{ij}$$

Bu toplanmış kolonların ve sütunların ortalama sayıları (ADU) bulunur ($\langle x \rangle, \langle y \rangle$). Bu ortalama şiddetler kullanılarak yeni yıldız merkezi aşağıdaki gibi hesaplanır. Yeni merkez ilk tahminin bir pixel kadar yakınlarıdaysa merkez doğrudur ama değilse yeni bulunan merkez ilk tahmin olarak alınır ve işlem doğru merkez bulunana kadar yeniden yapılır.

$$x_1 = \frac{\sum_i (\rho(x_i) - \langle x \rangle) x_i}{\sum_i (\rho(x_i) - \langle x \rangle)} \quad y_1 = \frac{\sum_j (\rho(y_j) - \langle y \rangle) y_j}{\sum_j (\rho(y_j) - \langle y \rangle)}$$

Yıldızın tabanı da etrafındaki yüzük şeklinde bir alandan hesaplanır. Taban halkasındaki pixel değerleri Gaussian dağılımı gösterir. Taban belirlemesi için aşağıdaki şu basit ilişki yeterlidir. Ortası ve ortalaması alınan değerler taban yüzüğündeki sayıdır (ADU).

$$\text{mod} = 3 \times \text{orta} - 2 \times \text{ortalama} \quad (\text{mode} = 3 \times \text{median} - 2 \times \text{mean})$$

Sonuç olarak yıldızların kaç kadir olduğu göreceli kadir hesabıyla bir Çerçeve Sabiti (Frame Constant) alınarak yapılır. Bu sabit sayı "C" 20-25 arasındadır. Aşağıdaki ilişkide S kaynak sayımı (ADU) ve Z de taban sayımıdır (ADU). Süre toplam entegrasyon zamanıdır.

$$m = C - 2.5 \log \left[\frac{S - Z}{\text{süre}} \right]$$

3.2. Noktasal Yayılım Fonksiyonlu Işık Ölçüm (Point Spread Function Photometry)

Kalabalık alanlarda iyi işleyen bir tekniktir. Biri deneysel diğeri model olmak üzere iki türlü noktasal yayılım fonksiyonu (PSF) kullanılır. Deneysel PSF'de sadece veri, model PSF'te de belli fonksiyonlar kullanılarak bir noktasal yayılım fonksiyonu elde edilir. Kullanılan tipik model fonksiyonlar Gaussian, Modified Lorentzian ve Moffat'tır. Bu tür bir fotometride ilk önce PSF'yi yapmak için görüntüden yıldızlar seçilir ve bu yıldızların kadirlerine göreceli olarak diğeri yıldızların kadirleri bulunur. Yıldızların taban sayısını bulma yöntemi ise açıklık fotometrisiyle aynıdır.

$$m_{\text{psf}} - m = 2.5 \log \left[\frac{S - Z}{S_{\text{psf}} - Z_{\text{psf}}} \right]$$

3.3. Standart Sisteme Çevirme

Hesaplanmış göreceli kadirler standart yıldızların gözlemlenmesiyle görünür kadire çevirilebilirler. Aşağıdaki ilişki genel olarak birçok fotometri programında bu çevirme işlemi için kullanılır. A_1 uyumlama katsayılarını ve X de hava kütesini göstermektedir. Örneğin $A_1 \approx 0.1$ ayarında bir değer alır. (B-V) standart yıldızın renk indeksidir.

$$V_{\text{std}} = V_{\text{alet}} + A_0 + A_1 (B-V) + A_2 X + A_3 X (B-V)$$

Bu çevirme için kullanılan programlar standart fotometri paketlerinin hemen hemen hepsinde bulunur. Örneğin PEPSYS (Midas) (Banse et al. 1985) ve PHOTCAL (Iraf) (Davis & Gigoux 1993). Bunların dışında genel CCD'ler ve CCD kullanarak neler yapılabileceği hakkında bilgiler şu kaynaklardan alınabilir: Golay 1974; Harris 1990; Howell 1989; Sterken & Manfroid 1992; Howell (ed.) 1991; Phillip 1979; Stetson 1987, 1990.

4. Fotometri (Işık Ölçüm) Programları

Genel veri analiz programlarının çoğunluğu CCD indirgeme paketi ve ışık ölçüm analiz programları içerir. Bunlardan en önemlileri şunlardır:

- 1) *MIDAS*: Daophot, Romaphot, Pepsys
- 2) *IRAF*: Apphot, Daophot, Surface Photometry
- 3) *STSDAS*: Isophote, Synthetic Photometry

Bu programlar ve fotometri paketleri hakkında bilgiler şu bilgi ağı sitelerinden bulunabilir:

http://astroa.physics.metu.edu.tr/MANULAS/midas_manual/doc/95NOV/vol2/node1.html

<http://iraf.noao.edu/docs/photom.html>

Bunların içinden fotometrik analiz için kullanımı yaygın olan DAOPHOT programını ana hatlarıyla açıklayacağım. Bu program Stetson tarafından yazılmıştır (Stetson 1987, 1990). Programın akışı ana başlıklarıyla aşağıdaki gibidir. İlk önce MIDAS'a girilip (yada IRAF) daophot programı çağırılır. "attach" komutuyla analiz etmek istediğiniz görüntüyü programa bağlarsınız. Bundan sonraki aşamalar komutlarıyla aşağıda belirtilmiştir.

- 1) *Sky*: "clipping method" u uygulayarak bütün görüntü için bir taban hesabı yapar.
- 2) *Options*: Bu en önemli kısımdır. Analizin yapılması için bir opsiyon tablosu doldurulur. Bu tabloda görüntünün tipik okuma gürültüsü, Kazancı, enalt ve enüst pixel ADUları, PSF yarıçapı, FWHM ölçüsü (görüntüden hesaplanır ve PSF yarıçapı FWHM'un iki katı alınır) ve başka parametreler doldurulur.
- 3) *Find*: Bu opsiyonlarla program yıldız merkezleri bulur. Bu komutun sonunda bir koordinat dosyası yaratır.
- 4) *Photometry*: Kabaca bir açıklık fotometrisi yapılarak kadirler hesaplanır ve bir dosyaya yazılır. Bu arada iki önemli karakteristik Gaussian özelliği "roundness ve sharpness" find komutuyla hesaplanıp yazılan dosyaya konulur ve photometry komutunda kullanılır (program tarafından). Belli kriterlerle Gaussian'ın FWHM (roundness) ve yüksekliğine (sharpness) göre bulunan yıldız fotometri uygulanır veya atılır.
- 5) *Pick*: Yüklüce bir sayı yıldız PSF yapmak için seçilir (30-50) ve bir dosyaya yazılır. Önemli olan bu yıldızların ne çok parlak nede sönük olmamalarıdır. Saçık bir görüntü vermemesi de önemlidir.
- 6) *Psf*: Seçilmiş yıldızlardan empirik bir PSF meydana getirir.
- 7) *Nstar, substar yada ALLSTAR programına geçilebilir*: Bundan sonra PSF fotometrisi yapılır. Nstar ve substar komutları kullanıldığında empirik PSF ile yıldızların kadirleri hesaplanarak bir dosyaya yazılır ve "substar" komutuyla bu yıldızların hepsi görüntüden çıkarılır. Eğer bu aşamada "allstar" programına geçilirse bu program empirik PSF'ye en iyi uyumlanan model PSF'yi hesaplayıp bunu kullanarak yıldızların kadirlerini hesaplar. Sonunda yine yıldızları çıkararak yeni bir görüntü yaratır. "allstar" programının bir üstünlüğü model PSF kullanarak eşzamanlı uyumlama yapmasıdır.

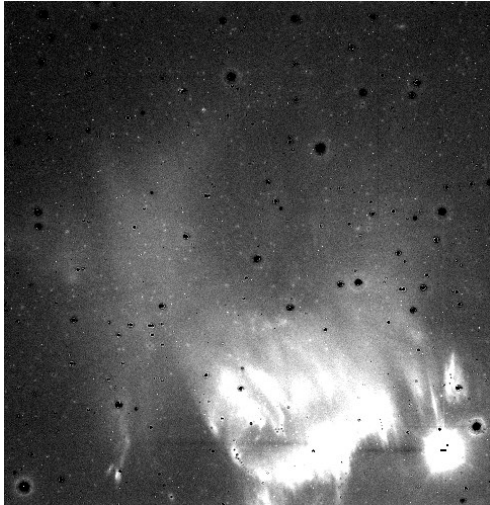
Sonuçta elimizde yıldızların olmadığı bir görüntü kalacaktır. Fotometrinin ne kadar başarılı olduğu bu görüntüden anlaşılabilir. İlk etapta genelde bütün yıldızlar çıkmaz ve bu operasyonu birkaç defa uygulamak gerekir (her seferinde aynı PSF yıldızlarını kullanarak). Sonunda her etapta bulunan yıldız koordinatlarının dosyaları "append" komutuyla birleştirilerek bir dosya haline getirilir. Son bir defa bütün prosedür (1-7) uygulanır (gene aynı PSF yıldızlarını kullanarak). Bu yöntemle bulduğunuz göreceli kadirler en doğrusu olacaktır. Yıldız çıkarılmış görüntü de en temizi olacaktır.



Şekil 1. Klasik nova Cygni 1992 ve çevresinin ön indirgemenen evvelki görüntüsü. Ayrıca bozuk kolonlar da görünmektedir.



Şekil 2. Klasik nova Cygni 1992 ve çevresinin ön indirgemenen sonraki hali. Bozuk kolonlar da bunların yanındaki iki kolonun ortalamasının alınıp bozuk kolona yazılmasıyla düzeltilmiştir.

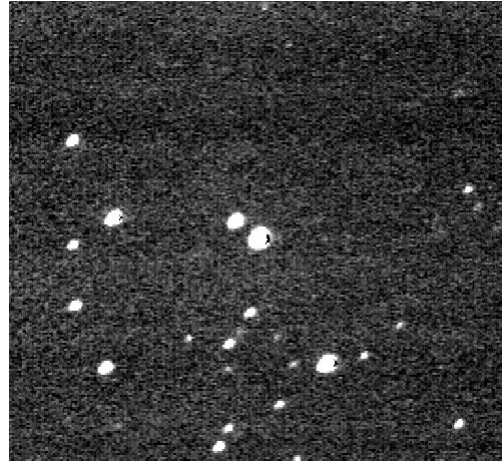


Şekil 3. Şekil 2 deki görüntüye fotometri uygulandıktan sonra yıldızların çıkartılmasıyla elde edilmiş görüntü. Saçık bulutsu novanın ilk ışığının etrafındaki tozları ve hidrojeni harekete geçirmesiyle oluşmuştur (a flash nebula; Casalegno et al. 2000).

Buna bir örnek olarak klasik nova Cygni 1992'nin görüntüsüne uygulanmış fotometrik analizin sonuçlarına bakalım. Şekil 1 nova ve çevresinin ön indirgemenen evvelki; Şekil 2 ön indirgemenen sonraki görüntüsüdür. Şekil 2 deki görüntüye fotometri uygulandıktan sonra yıldızların çıkartılmasıyla Şekil 3 deki görüntü elde edilmiştir. Bu görüntüye kozmik ışınların etkisini temizlemek için bir süzgeçleme yapılmıştır. Görüntü Kitt Peak NOAO, Arizona, ABD de 3.5 m lik bir teleskopla Mayıs 1997 de alınmıştır.

5. TUG ile CCD Kullanarak Yapılan İlk Işık Ölçümü

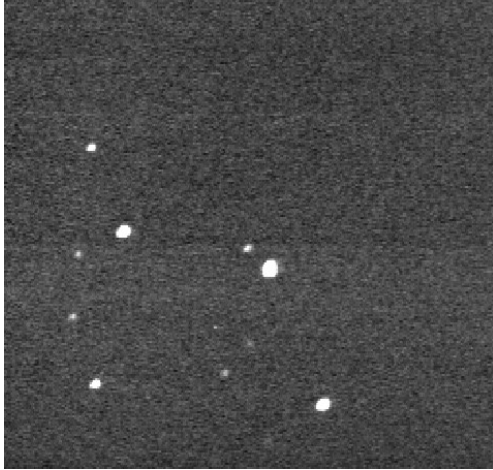
CCD kullanarak ilk ışık ölçüm TUG da Eylül ve Ekim 1998 yılında yapılmıştır. Önerinin genel amacı klasik novaların ışık eğrilerindeki değişimleri, hump veya superhump periodlarını aramaktır. Bunun için örnek bir nova, Nova Cas 1995, seçildi ve bu kaynaktaki bulunmuş ve olabilecek periodlara bakıldı. Asıl amaç CCD ile ölçüm yapıp elimizdeki CCD nin kapasitesini de ölçmektir. Nova Cas 1995 bütün gözlemlerde ya birikmiş yada doymuş olarak bulundu. Alan başına kadir aralığı yaklaşık 4 ($\Delta m=4$); filtrelerin ışık geçirgenliği I filtresi için %16 ve V filtresi için % 8 olarak hesaplandı. Şekil 4, 5 ve 6 Nova'nın bulunduğu alanın filtresiz, I ve V filtreleriyle alınmış ön indirgemenen geçirilmiş görüntüleridir. Bu görüntülere ve aynı zamanda CCD ile kalibrasyon için alınmış bir yıldız kümesinin (NGC 7790) görüntülerine DAOPHOT programıyla fotometri uygulanmıştır. Tablo 1.'de bazı sonuçlar verilmiştir. Tabloda parantez içinde verilen değerler görünür kadirlerdir. NGC 7790 görüntüsündeki bir K tipi yıldızın bilinen görünür I ve V kadirlerini kullanarak kalibrasyon yapılmıştır. Filtresiz gözlemlere bu tür bir kalibrasyon yapılamaz.



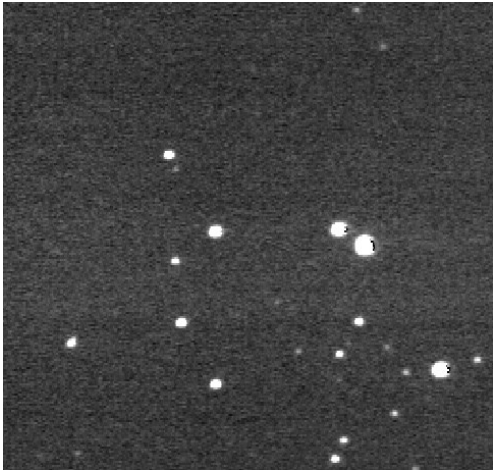
Şekil 4. Klasik nova 1995 ve etrafının 40 sm lik teleskopla (TUG) filtresiz alınmış CCD görüntüsü.

Tablo 1: Alanlara göre enüst ve enalt göreceli kadirler

Alan	Filtre	Enüst Kadir	Enalt Kadir
N Cas 1995	--	16.47	21.0
NGC 7790	--	15.12	20.06
NGC 7790	I	15.00 (10.58)	19.95 (15.80)
NGC 7790	V	15.89 (12.45)	19.86 (16.40)



Şekil 5. Klasik nova 1995 ve etrafının 40 sm lik teleskopla (TUG) V filtresiyle alınmış CCD görüntüsü.



Şekil 6. Klasik nova 1995 ve etrafının 40 sm lik teleskopla (TUG) I filtresiyle alınmış CCD görüntüsü.

6. Özet ve İleriki Planlar

CCD ile fotometri artık günümüzde bütün dünyada yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Türkiye’de de CCD ile görüntüleme ve fotometri uygulama hızlı bir şekilde kullanılmaya başlanmalıdır. Bu ilk ölçümlerde 40 sm lik teleskopla 17 kadire kadar inilebilmiştir. Kullanılan CCD eski ve maximum 256 ADU luk pixelli görüntüler verdiği için kullanımı kısıtlıdır ama 1.5 m lik teleskop için yeni alınan CCD en az 21 kadire kadar inebilecek kapasitededir, Δm yaklaşık 12 kadir kadar olacaktır. İlk etapta 1.5 m lik teleskopla Nova, Cüce Nova, Kataklişik

Değişkenlerin ışık eğrilerini çalışmak için TUG’a bir öneri verilecektir (Bu öneri Şubat 2000 de teslim edilmiştir). Bunun dışında bahsi geçen klasik nova Cygni 1992’nin etrafında bulunan bulutsunun gelişimi TUG’la kalibrasyon kaynağı olarak yeni gözlemlerle izlenecektir.

Teşekkür

CCD ile ilk gözlemlerin yapılmasında yardımcı olan Ümit Kızıloğlu’na, verilerin indirgenmesinde çalışan proje öğrencim Yasemin Gürcan’a teşekkürler ederim.

Kaynaklar

- Banse K., Grosbol P., Ouonnas C., Warmels R., 1988, *The Midas Image Processing System*, in *Instrumentation for Ground Based Astronomy Present and Future*, (ed. I.B. Robinson), Springer, NY, p.431
- Casalegno R., Orio M., Mathis J., Conelice C., Gallagher J., Balman S., Della Valle M., Homeimer N., Ögelman H., 2000, *A&A*, (baskıda).
- Davis L.E., Gigoux P., 1993, *PHOTCAL: The IRAF Photometric Calibration Package*, (eds. Worrall, D.M., Biemesderfer C., Barnes, J.), *ASP Conf. Ser.*, Vol.52, p.479
- Golay M., 1974, *Introduction to Astronomical Photometry*, D. Reidel Publishing, Dordrecht-Holland.
- Harris W.E., 1990, *PASP*, **102**, 949
- Howell S.B., 1989, *PASP*, **101**, 616
- Howell S.B. (ed.), 1991, *Astronomical CCD Observing and Reduction Techniques*, *ASP Conf. Ser.*, Vol.23
- Philip A.G. Davis (ed.), 1979, *Problems of Calibration of Multicolor Photometric Systems*, Dudley Observatory, Schenectady, New York
- Stetson P.B., 1987, *PASP*, **99**, 191
- Stetson P.B., 1990, *PASP*, **102**, 616
- Sterken C., Manfroid J., 1992, *Astronomical Photometry: A Guide*, Kluwer, Dordrecht