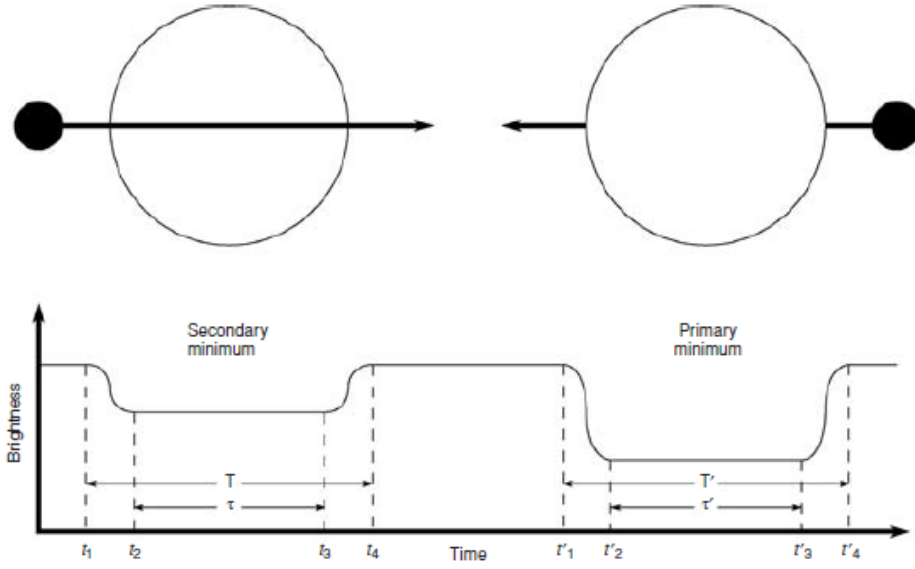


6. ÖRTEN DEĞİŞEN ÇİFT YILDIZLAR (Eclipsing Binary Stars): Gözlemler, Yörünge Parametreleri ve Genel Özellikleri

Örten değişen çift yıldızlar (Şekil 6.1), yörünge düzleminin neredeyse kenardan görüldüğü sistemlerdir. Yıldızlardan biri dönemli olarak diğerini örttüğü zamanlarda sistemin toplam parlaklığı azalır. Parlaklık değişimi geometrik durum nedeniyle ortaya çıkar. Ek olarak bileşen yıldızların fiziksel veya bünyesel değişim gösterme olasılıkları da bulunur.

Çift yıldız sistemleri konusunda yürütülen araştırmaların en önemli nedenleri arasında bütün yıldızların yarısının çift veya çoklu sistem olmalarıdır. Bu durum evrenimiz için normal olarak kabul edilebilecek bir durumdur. En azından 300'den fazla parlak yıldızın %3'ünün örten değişen sistem olduğunu biliyoruz.



Şekil 6.1. Basit örten değişen bir sistemin şematik durumu ve ışık eğrisi. Alt kısımda bulunan ışık eğrisinde zaman soldan sağa doğru artmaktadır. Daha parlak olan küçük yarıçaplı (siyah renkte gösterilmiştir) bileşen, sol şekilde daha büyük (daha sönük) yıldızın önünden geçmektedir ve bu nedenle *ikinci minimum* olarak adlandırılan parlaklık azalması gerçekleşir. t_1 , t_2 , t_3 ve t_4 zamanları dört adet değme zamanını göstermektedir. Parlak bileşen sönük bileşenin arkasından geçtiğinde (sağ şekil) parlaklık değişimi daha büyük olur ve ışık eğrisindeki bu bölgeye *birinci minimum* adı verilir.

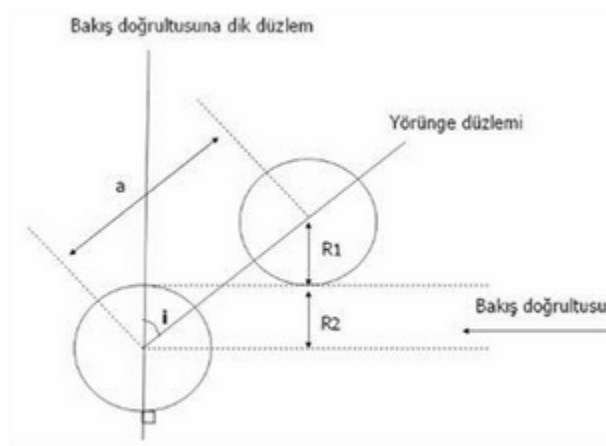
Çizelge 6.1 Parlak ve/veya ilginç örten değişenler

| Name | HD | V Range | Period (d) | Spectrum | Comments |
|-----------|--------|------------|------------|--------------------|------------------------------------|
| U Cep | 5679 | 6.75–9.24 | 2.4930475 | B7Ve + G8III–IV | EA/SD; deep eclipse |
| ζ Phe | 6882 | 3.91–4.42 | 1.6697671 | B6II + B9V | EA/DM |
| RZ Cas | 17138 | 6.18–7.72 | 1.195247 | A2.8V | EA/SD; deep eclipse |
| β Per | 19356 | 2.12–3.39 | 2.8673043 | B8V + G7III | EA/SD; prototype |
| λ Tau | 25204 | 3.37–3.91 | 3.9529478 | B3V + A4IV | EA/DM |
| ε Aur | 31964 | 2.92–3.83 | 9892 | A8Ia–F2epIa + BV | EA/GS; long period |
| ζ Aur | 32068 | 3.70–3.97 | 972.16 | K5II + B7V | EA/GS; long period |
| δ Ori | 36486 | 2.14–2.26 | 5.732476 | O9.5II–III + B0III | EA/DM |
| BM Ori | 37021 | 7.90–8.65 | 6.470525 | B2V + A7IV | EA; in Trapezium; θ^1 Ori B |
| V1016 Ori | 37020 | 6.72–7.65 | 65.43233 | O7 + B0.5Vp | in Trapezium θ^1 Ori A |
| β Aur | 40183 | 1.89–1.98 | 3.9600421 | A2IV + A2IV–V | EA/DM |
| UW CMa | 57060 | 4.84–5.33 | 4.393407 | O7Ia:fp + OB | EB/KE |
| YY Gem | 60179C | 8.91–9.60 | 0.81428254 | M1Ve + M1Ve | Castor C |
| V Pup | 65818 | 4.35–4.92 | 1.4544859 | B + B | EB/SD |
| W UMa | 83950 | 7.75–8.48 | 0.33363749 | F8Vp + F8Vp | EW/KW; prototype |
| RS CVn | 114519 | 7.93–9.14 | 4.797887 | F4IV–V + K0IVe | EA/AR/RS; prototype |
| δ Lib | 132742 | 4.91–5.90 | 2.3273543 | A0IV–V + | EA/SD |
| α CrB | 139006 | 2.21–2.32 | 17.359907 | A0V + G5V | EA/DM |
| V1010 Oph | 151676 | 6.1–7.0 | 0.66142613 | A5V | EB/KE |
| u Her | 156633 | 4.60–5.28 | 2.0510 | B1.5V + B5III | – |
| W Ser | 166126 | 8.42–10.20 | 14.15486 | F5elb(shell) | EA/GS |
| β Lyr | 174639 | 3.25–4.36 | 12.913834 | B8II–III + | EB; prototype |
| VV Cep | 208816 | 4.80–5.36 | 7430 | M2epIa + B8:Ve | EA/GS + SRC; prototype |

Gözlemler

Geçmişten günümüze kadar önce çıplak gözle, sonra fotoğraf plakları kullanılarak ve ardından fotoelektrik yöntemler kullanılarak gözlemler gerçekleştirilmiştir. İlk keşfedilen örten değişen çift yıldız sistemi Algol olmuştur. Gözlemler, zamana bağlı olarak sistemin parlaklığının ölçümünü içerir. Daha önceki bölümlerde çift yıldız sistemlerinin çok geniş bir aralığa dağılmış dönem değerleri olduğunu görmüştük. Bu tür sistemlerin keşfedilme olasılıkları temel olarak parlaklık değişim miktarına çok bağlıdır. Parlaklık değişimi ne kadar büyük olursa sistemin keşfedilme olasılığı da o kadar artar. Bu durum ise temel olarak bileşen yıldızların parlaklıkları arasındaki farkın büyük olması ve yörünge eğim açısı olarak adlandırdığımız i değerinin 90° ye yakın olması durumunda gerçekleşir.

i yörünge eğim açısının 90° ye yakın olması durumunda bile bileşen yıldızlar birbirlerine çok uzak konumlarda bulunuyorlarsa herhangi bir örtme veya örtülme olayı ile karşılaşamayabilir. Bileşen yıldızların birbirlerine yakın olmaları durumunda ise örtme veya örtülme olayının gerçekleşme olasılığı artar.



Şekil 6.2. Çift yıldız sistemlerinde tutulma koşulu.

Çift yıldız sistemlerinde tutulma koşulu, bileşen yıldızların R_1 ve R_2 yarıçapları, bileşen yıldızlar arasındaki a uzaklığı ve yörünge eğim açısı i ye bağlıdır.

$$|\sin(90 - i)| = |\cos i| < \frac{R_1 + R_2}{a}$$

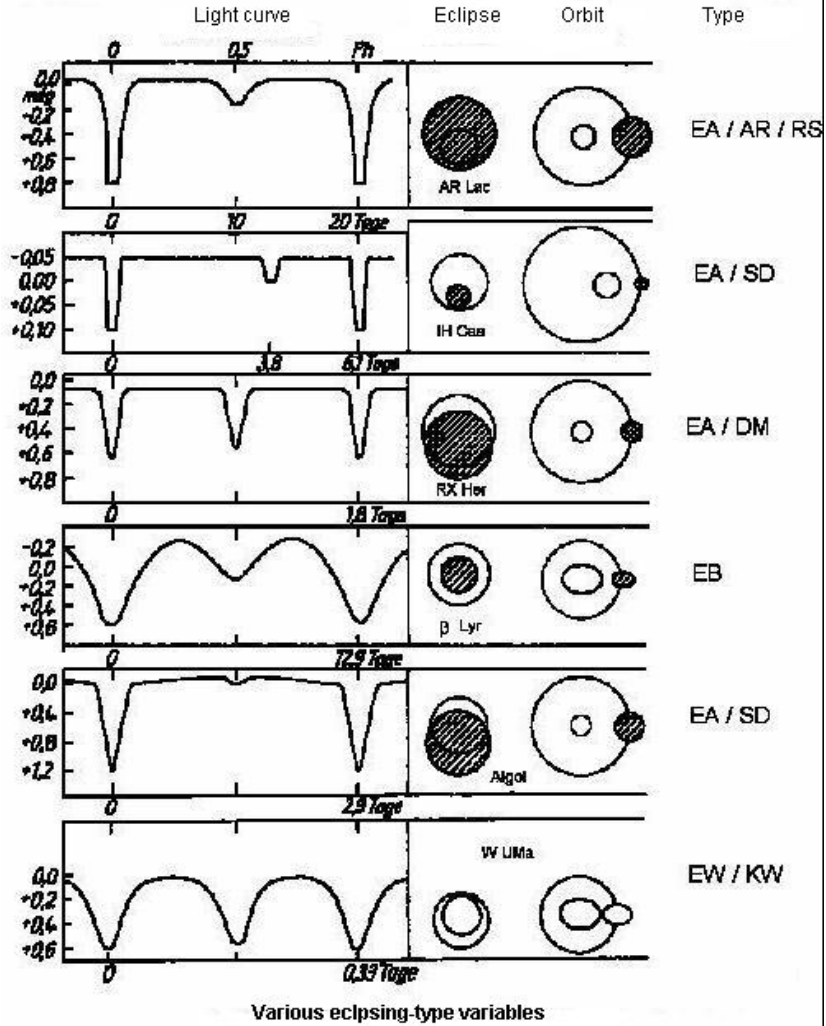
olarak Şekil 6.2'den yazılabilir. İfade incelendiğinde yörünge eğim açısının 90° olması durumunda bileşen yıldızlar arasındaki uzaklık ve yıldızların yarıçapları hangi değeri alırsa alsın kesin bir tutulma gerçekleşir. Onun dışındaki durumlarda ise yarıçaplar toplamının büyük olması durumunda ve bileşen yıldızlar arasındaki uzaklığın küçük olması durumunda tutulma olasılığı artacaktır. Eşitlik olması durumunda bakış doğrultumuza göre yıldız diskleri teğet geçeceğinden herhangi bir tutulma görülmeyecektir. Bileşen yıldızların birbirlerine yakın olması, yörünge döneminin de küçük olmasını gerektirir. O nedenle yörünge dönemi küçük olan sistemler için tutulma olasılıkları daha yüksek olacaktır.

Örten değişen sistemler: Işık Eğrilerinin Biçimine Göre Sınıflandırma

Örten değişen sistemler, geleneksel olarak ışık eğrilerinin biçimine göre sınıflandırılmışlardır. Bu tür bir sınıflandırmada ışık eğrilerinde görülen veya görülmeyen özellikler dikkate alınır.

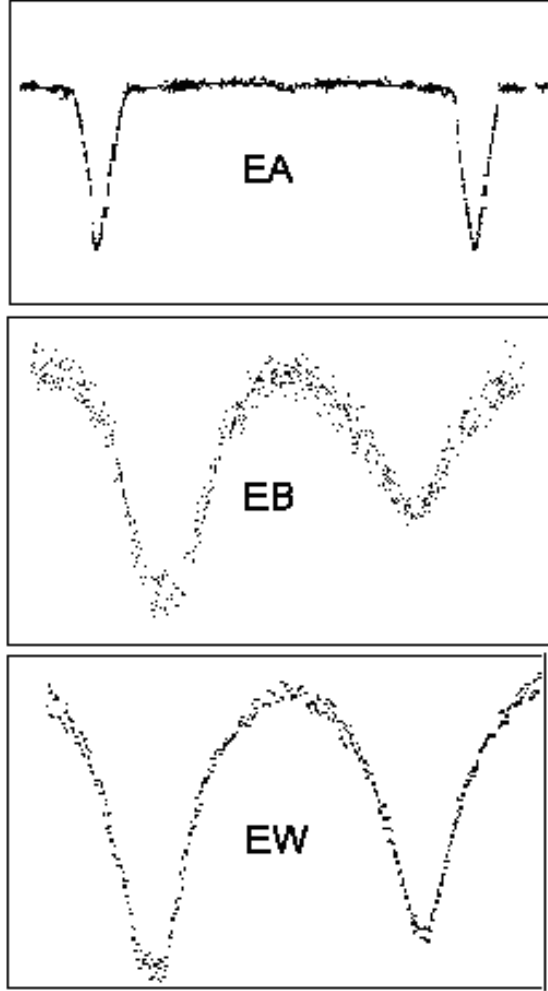
GCVS'ye göre:

- **Algol (EA):** Neredeyse düz maksimuma sahip ve bileşenleri küresellikten ayrılmamış olduğu sistemlerdir.
- **Beta Lyrae (EB):** Hafif bozulmuş ışık eğrisine sahip sistemlerdir ve bileşen yıldızlar elipsoid şekle sahiplerdir.
- **W Ursae Majoris (EW):** değişenlerinin ışık eğrilerinde sürekli değişim gözlenir. Bileşen yıldızlar gerçekte birbirlerine değen sistemlerdir. Dönemleri küçüktür, genellikle bir günden kısa, minimum derinlikleri birbirlerine çok yakındır (%10 kadar ölçüsünde) ve yıldızlar genellikle F ile G veya daha geç tayf türüne sahiplerdir.



C. Hoffmeister - Veränderliche Sterne - 2ème édition - 1984 p. 211
d'après Struve 1962, complété

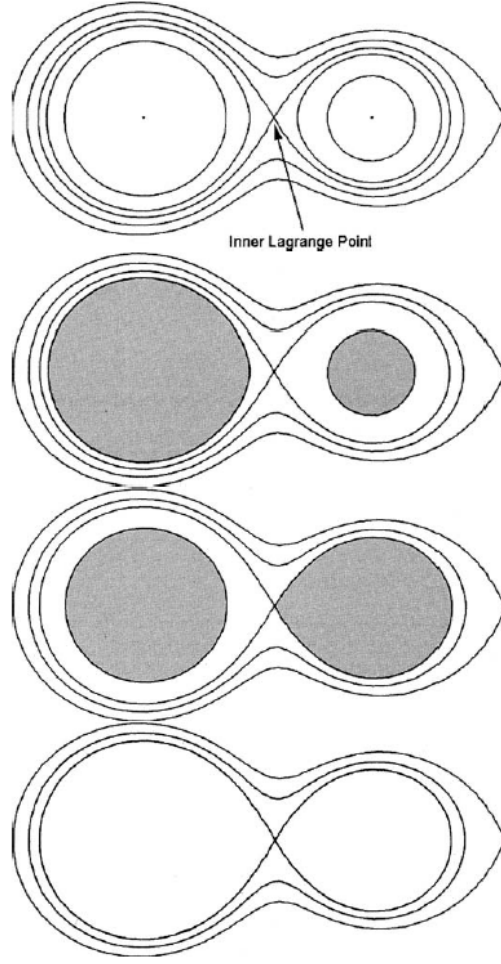
Şekil 6.3. Işık eğrilerinin biçimsel sınıflandırması.



Şekil 6.4. Farklı türden örten değişen sistemlere ilişkin gözlemler.

Zamanla bu sınıflandırma biçimi terkedilmeye başlanmıştır fakat yine de tarihsel nedenlerden dolayı literatürde kullanılmaya devam edilmiştir. Örneğin, garip değişimleri nedeniyle Beta Lyrae türü sistemler aslında herhangi bir sınıfı temsil edebilecek özelliklere sahip değildir. EA ve EW türleri de öyledir, fakat tayfın iki uç noktasını gösterirler. Algol türü çift yıldızlar artık yarı-değen sistemler oldukları kabul edilmesine rağmen, ayırık çift yıldızları temsil edecek şekilde sınıflandırılmaya devam edilmektedir. EA türleri artık ortalama olarak “ayırık” ve EB’ler ise “yarı-ayırık” sistemleri temsil etmek için kullanılmaktadır.

Örten değişen sistemlerin modern sınıflandırması (ve genel anlamda çift yıldız sistemleri) *Lagrange yüzeyleri* ile *Roche Lobları*’na dayanır ve bu durum Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Noktasal bir kütle (veya yıldız), merkezi bir noktadan farklı uzaklıklardaki çekimsel potansiyel enerjinin sabit olduğu küreler ile temsil edilir. Merkezi noktadan uzaklaştıkça potansiyel enerji azalır.



Şekil 6.5. Birbirleri etrafında yörüngesel harekette bulunan bir çift yıldız sistemi etrafında oluşan

Lagrange yüzeyleri. Yukarıdan aşağıya doğru:

- i. Genel Lagrange yüzeyleri;
- ii. Ayrık çift yıldızlarda bileşen yıldızlar kendi Roche şişimlerinden daha küçük durumdadırlar;
- iii. Yarı-ayrık sistemlerde bileşen yıldızlardan biri Roche şişimini doldurmuş diğeri ise doldurmamış durumdadır;
- iv. Değen sistemlerde her iki bileşene ait yıldız maddesi ortak bir zarf içerisinde bulunur (Terrell, 2001).

İki adet noktasal kütle (veya yıldızın) birbirleri etrafında yörüngesel harekette bulduklarında çekimsel potansiyel enerjilerinin sabit olduğu yüzeyler Şekil 6.5’de gösterilmiştir. Bu yüzeyler yıldızlara yakın konumlarda neredeyse küresel biçime sahiplerdir. Fakat “*kritik yüzey*” olarak adlandırılan – kum-saati biçimi (veya 8 biçimli şekil ki bu durumda iki boyutlu bir yapı ile karşılaşılır, gerçek durum ise üç boyutludur ve kum saati buna verilebilecek en güzel örnektir) almaktadır. Bu kum saatli şeklin her iki yarısına *Roche lobu* adı verilir. Roche loblarının kesiştiği nokta *iç lagrange noktası* olarak adlandırılır ve L_1 ile gösterilir.

Okyanus yüzeyi bir eş-potansiyel yüzeydir veya sabit çekim potansiyeline sahip bir yüzeydir. İlk yaklaşım olarak bir küre biçimine sahiptir. Dünya’nın dönmesi nedeniyle ekvator bölgelerinde bir şişkinlik

meydana gelir ve Güneş ile Ay'ın çekimsel etkileri nedeniyle ortaya çıkan gel-git kuvvetleri sonucu da okyanus yüzeyleri küresel biçimden ayrılır.

Hatırlanması gereken önemli bir nokta Lagrange yüzeylerinin üç boyutlu olduğudur. Şekillerde gösterilen ise yörünge düzlemi dikkate alınarak elde edilmiş kesit görüntüleridir. Etki olarak çekimsel potansiyel dördüncü boyuta sahiptir. Ve yıldızlar bu çekimsel potansiyel “duvarı” içerisinde yer alırlar. Lagrange yüzeyindeki her nokta için belirli bir kütleyle (örneğin 1 kg) sahip parçacığı sonsuza gönderebilmek için aynı enerjiye ihtiyaç duyulur. Hatırlanması gereken bir diğer konu ise parçacıkların (örneğin gaz) sistem içerisindeki hareketlerinin sadece çekim kuvveti ile değil aynı zamanda parçacıkların *açısal momentumu* ile belirlendiğidir. Parçacıkların açısal momentumları korunumludur ve parçacıkların hareketleri süresince sabit kalır.

Eğer bileşenlerden biri evrimleşerek yavaş bir şekilde genişlerse bu durumda bir süre sonra Roche lobunu doldurur. Yıldız genişlemeye devam ederse, yıldız maddesi en zayıf direncin olduğu yolu takip eder ve L_1 noktasından diğer bileşene akar. Bu olaya *Roche lobu taşması* adı verilir. Madde diğer bileşene doğru hareket eder, fakat aynı zamanda bu madde açısal momentuma sahip olduğundan gerçekte spiral bir yol takip eder. Çift yıldızların evrimi, tek yıldızların evrimine ilişkin modellemelerden çok daha karmaşıktır. Nedeni ise madde alış-verişi ve yığılma diski gibi oluşumların bu tür sistemlerde oldukça dinamik yapılar olmasıdır.

Çift Yıldızların Modern Sınıflandırması

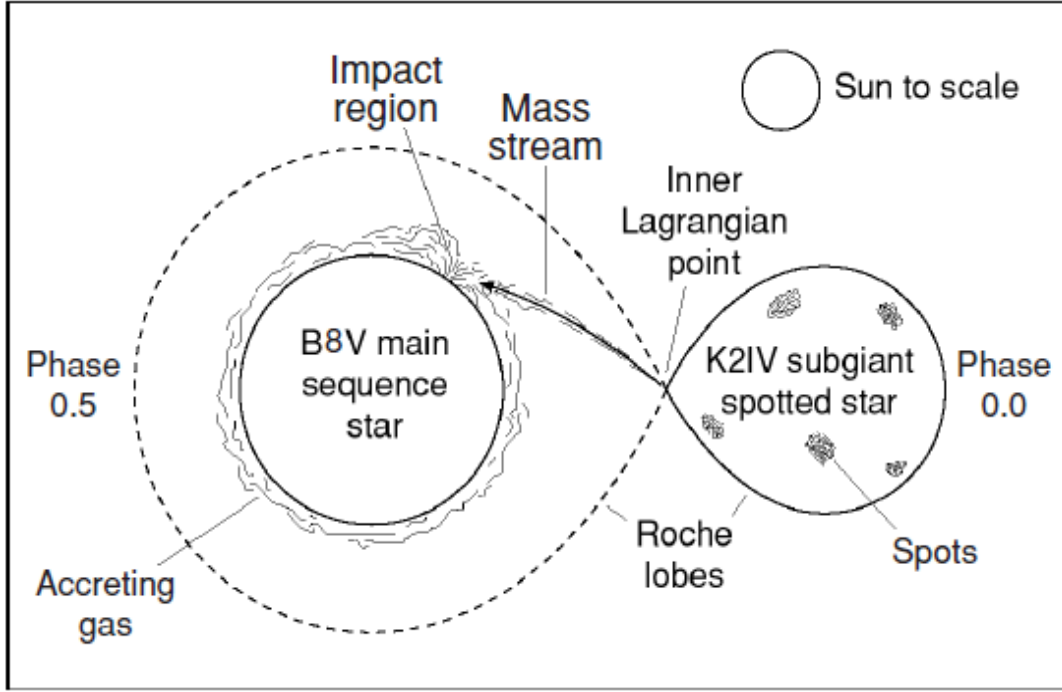
- **Ayrık çift yıldızlar**, her iki bileşenin Roche şişimi içerisinde kaldığı sistemlerdir. Çekimsel gel-git kuvvetleri nedeniyle biçim bozulmaları çok düşük düzeyde olacağından bileşenler biçim olarak neredeyse küresel yapıya sahiplerdir. Kütle, yarıçap ve sıcaklık gibi parametreleri tutulma gösteren ışık eğrileri ile dikine hız gözlemlerinden bulunur.
 - GCVS4'de D sembolü kullanılır ve DM (ayrık anakol bileşenli sistemler), DS (ayrık, bileşenlerinden biri alt dev olan sistemler), AR (AR Lacertae türü ayrık sistemler, altdev bileşenin iç Lagrange yüzeyini doldurmadığı durum) ve DW (W Ursae Majoris sistemlerine benzer olanlar fakat değmeyen sistemler).
- **Yarı-ayrık çift yıldızlar** (GCVS4'de SD olarak kodlanırlar), bileşenlerden birinin Roche şişimini doldurmuş olduğu, diğerinin Roche şişimi içerisinde kaldığı sistemlerdir. Şişimini dolduran bileşenin biçimi bozulmuştur ve muhtemelen diğer bileşenine iç Lagrange noktasından madde aktarmaktadır. Diğer bileşen ise neredeyse küresel biçime sahiptir (Şekil 6.6).
- **Değen çift yıldızlar** (GCVS4'de K olarak kodlanırlar), her iki bileşenin Roche şişimini doldurmuş olduğu, gerçekte birbirlerine değen sistemlerdir. Her iki bileşeni saran ortak bir zarf bulunur ve bileşen yıldızların kendi kimliklerini gizler. Bu duruma karşılık gelen sistemlere *aşırı-değen çift yıldızlar* adı verilir. GCVS4'de alt sınıf olarak sıcak olanlarına (KE) ve soğuk olanlarına (KW) kodlaması yapılır.

Örten değen sistemler üzerinde çalışan araştırmacılar genel olarak EA, EB, EW şeklinde sınıflandırma yaparlar. Fakat yukarıda bahsedilen konular ile ilgilenmeleri durumunda sistem için ek açıklamalarda bulunurlar.

Bir başka sınıflandırma şekli ise sistemi oluşturan bileşen yıldızların türleri (evrimsel durumları) dikkate alınarak yapılır. Bileşenlerinden biri beyaz cüce, nötron yıldızı veya karadelik olan sistemler, dev veya süperdev bileşenli sistemlerin yarı-ayrık veya değen sistem olmaları gibi bir sınıflandırmadır.

GCVS4'de kullanılan üçüncü bir sınıflandırma yönteminde:

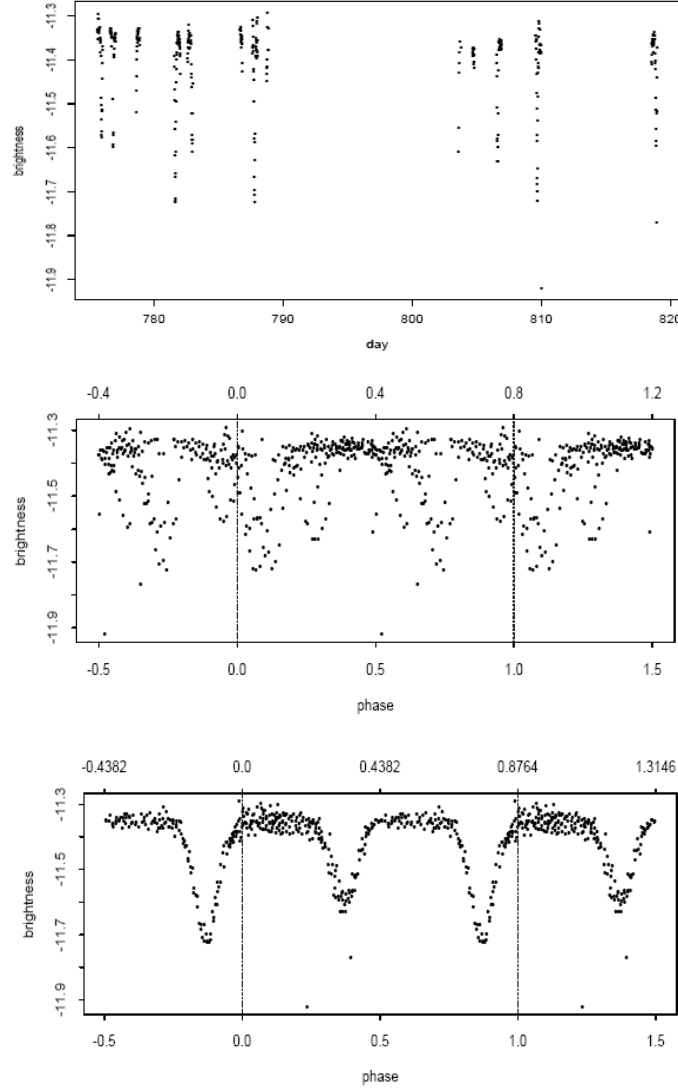
- GS gösterimi sistemde bileşen yıldızlardan biri veya her ikisinin dev olması durumunu,
- PN sistemde bir gezegenimsi bulutsu çekirdeği olmasını,
- RS gösterimini RS Canum Venaticorum sistemlerini,
- WD beyaz cüce bileşenli sistemleri ve
- WR ise Wolf-Rayet bileşenli sistemleri göstermek amacıyla kullanılır. Bu türden egzotik bileşenlere sahip sistemler genel olarak patlamalar içeren değişimler gösterirler.



Şekil 6.6. Bileşenler arasında kütle aktarımının olduğu durumu gösteren şematik çizim. Bu sistem özel olarak Algolleri göstermek amacıyla oluşturulmuştur. K2IV yıldızı Roche şişimini doldurmuş ve B8V yıldızına kütle aktarmaktadır. Akan madde ise karşıdaki bileşenin yüzeyine çarpılmaktadır. Güneş'in boyutu ise ölçekli olarak sağ üst kesitte verilmiştir. (Jeff Dixon Graphics).

Yörünge Dönemi (P)

Örten değişen sistemlerde dönem, art arda yıldızlardan birinin diğerini örtmesi için geçen süredir. Derin olan tutulmaya *birinci minimum*; daha sığ olana ise *ikinci minimum* adı verilir. Bu nedenle dönem, art arda iki birinci veya iki ikinci minimum arasında geçen süre olarak hesaplanır.



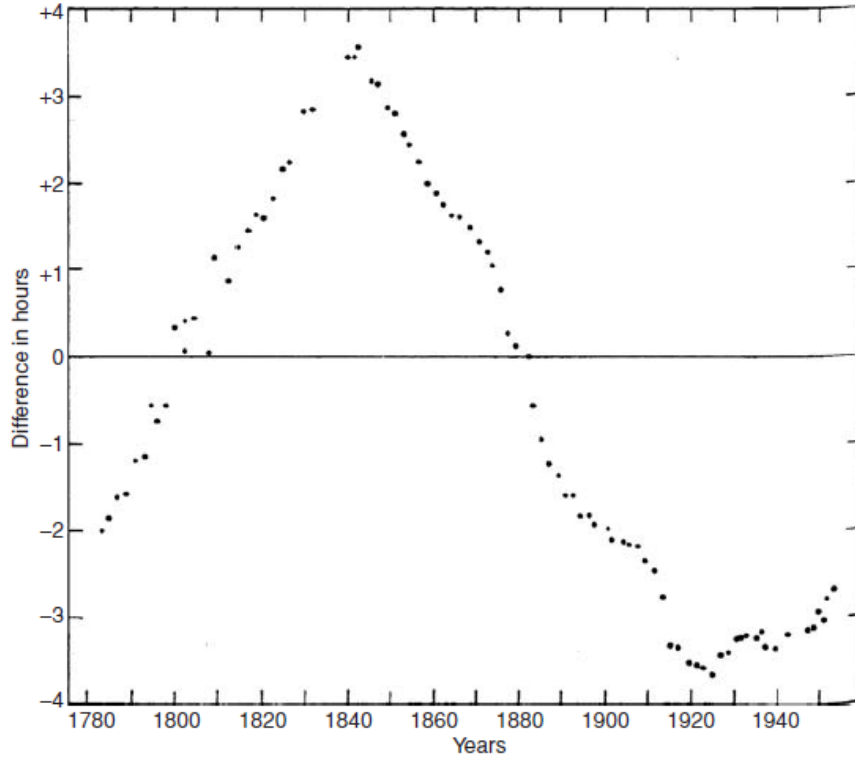
Şekil 6.7. Üst şekil: Farklı gözlem zamanlarına dağılmış parlaklık değişimi (Işık Eğrisi). Orta şekil: Aynı gözlem verileri için gerçekleştirilmiş dönem araması ile ulaşılan ilk sonuç. Alt şekil: Sistemin dönemi belirlenmiş ve bu dönem dikkate alınarak evreye göre parlaklık değişimi grafiğe geçirilmiştir.

Şekil 6.7’de yaklaşık 45 gün’e dağılmış bir çift yıldız sisteminin parlaklık değişimi (fotometrik gözlemleri) görülmektedir. Uzun zaman aralığına dağılmış bu tür bir gözlemden sistemin ne tür bir parlaklık değişimi gösterdiğini anlamak mümkün değildir. Parlaklık değişimi gösterdiği kesindir fakat bu parlaklık değişiminin herhangi bir döneme sahip olup olmadığı açık değildir. O nedenle astronomlar farklı zamanlarda alınmış gözlemlerde dönemlilik olup olmadığını araştırırlar. Bu amaçla kullanılan çeşitli

yöntem ve programlar mevcuttur. Fourier yöntemi bunlardan biridir ve frekans bölgesinde (1/zaman) sinüs ve kosinüslü terimler kullanarak belirli iki frekans sınırlarında sizin belirleyebildiğiniz aralıklarda tarama gerçekleştirir. Bu tür bir analiz sonucunda herhangi önemli bir dönemlilik yakalandığında frekans eksenine göre güç spektrumu adını verdiğimiz bir değerini grafiğini çizer. Gözlem verilerinin dağılımına ve gözlem verilerinin duyarlılığına bağlı olarak incelenen bu tür grafiklerden dönemli değişimler varsa kolaylıkla bulunabilmektedir.

Bu amaçla kullanılabilir farklı analiz yöntemlerini literatürde bulmak mümkündür. Bu tür bir analizi el yordamıyla da gerçekleştirmek mümkündür. Gözlem verilerinin zamana bağlı dağılımının uygun olması durumunda başarılı sonuçlar elde etmek mümkündür.

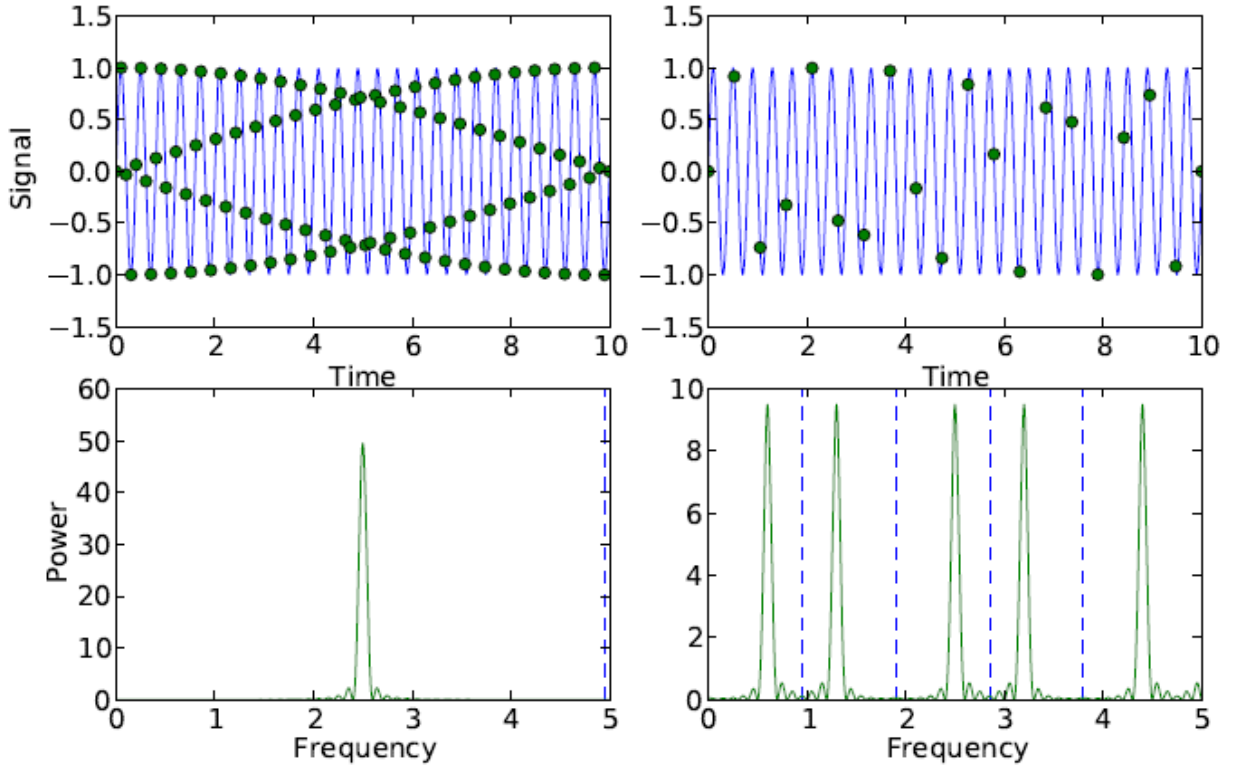
Örten değişenlerin dönem değişimi konusu son yıllarda özellikle amatör veya öğrenci gözlemcilerin de gerçekleştirebildiği çalışmalardır. Eğer minimumlar derin ise bu durumda görsel olarak da belirlenebilmektedir, fakat bu durumda belirlenen minimum zamanları birkaç dakika kadar hatalı olabilmektedir. Bu türden gözlemlerin uzun yıllar veya birkaç on yıllık süreler boyunca yapılmasına ihtiyaç duyulur. Dönem analizi, standart (O-C) veya evre-kayması yöntemi kullanılarak incelenebilmektedir. Algol için elde edilen sonuçlar Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Diyagramda görülen eğrisel değişimden sistemin döneminin sabit kalmadığı anlaşılmaktadır. Bu tür bir hesaplamada O, gözlenen minimum zamanlarını ve C ise hesaplanan minimum zamanını gösterir.



Şekil 6.8. Algol'ün (O-C) diyagramı. Kütle aktarımı nedeniyle dönemde değişim olduğu görülmektedir. (O-C) değişimi birkaç saat'e kadar ulaşmaktadır ve görsel gözlem yapan kişiler tarafından kolaylıkla ölçülebilmektedir. (Herczeg ve Frieboes-Conde, 1968).

Çift yıldız sistemlerinde dönem değişimi genellikle bileşen yıldızlar arasındaki *kütle aktarımı* sonucu gerçekleşir. Bazen kütle, sistemden tamamen kaybedilir. Dönem değişiminin miktarı (\dot{P} ile gösterilir ve dP/dt anlamında kullanılır) ve bu ifade kütle aktarımı veya kütle kaybı (\dot{M} ile gösterilir) ile bağlantılıdır. Çok yakın çift sistemlerde dönem ayrıca çekimsel gel-git olayı nedeniyle ortaya çıkan enerji kaybı sonucu da ortaya çıkabilir veya çekimsel ışımaya yoluyla gerçekleşebilir – ki bu durum Einstein tarafından genel görelilik teoreminin bir öngörüsüdür.

Dönem değişimi görülmesinin bir başka nedeni ise ışık-zaman etkisinden kaynaklanır. Gerçek anlamda sistemin dönemi değişmez fakat üçüncü bir cisimle birlikte çift sistem ortak kütle merkezi etrafında hareket ettiğinde minimum zamanları bize daha erken veya daha geç ulaşır. Dolayısıyla bu tür sistemlerin O-C değişimlerinde periyodik yapılar görülür. Dönem değişimine neden olabilecek başka etkilerde bulunur, örn. manyetik alan etkinliği, eksen dönmesi gibi.



Şekil 6.9. Farklı gözlem zaman aralığına dağılmış gözlemlerden dönem bulunması. Sol üst ve alt şekilde düzgün zaman aralıklı verilerden elde edilen dönem ve Sağ üst ve alt şekilde ise düzgün aralıklı alınmamış gözlemlerden bulunan dönem ve sahte dönemler görülmektedir.