

変光星・突発天体現象概論

植村誠(広島大学)

@夏の学校2011

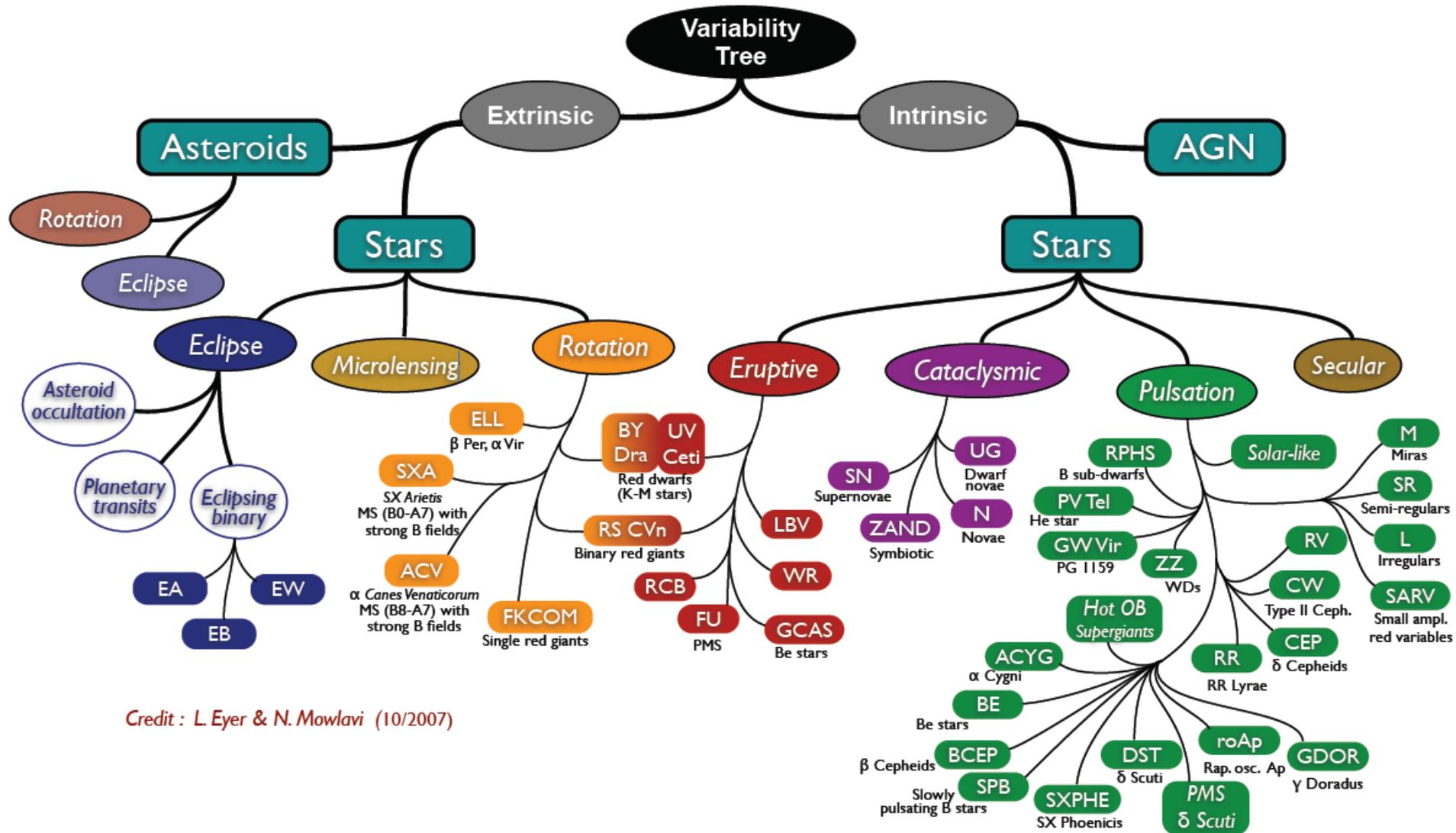
本講義の目的

- 可視光で大きな変光を示す天体全般を広く浅く学ぶ。
- いろいろな星があるんだなあ、と思ってくれれば。

今日の話

- 変光星についてのイントロ
- 最近の国内でよく研究されてる変光星の概論
- その他の変光星の概論(時間ある限り)
- まとめ

GCVS分類



Credit : L. Eyer & N. Mowlavi (10/2007)

GCVS分類

- GCVS I~IIIの合計 (<2004年)
 - 変光星分類数:207
 - 変光星数:38525
- 星自身は変動していない (extrinsic)
 - 食連星 (~5,800; ~15%)
 - マイクロレンズ天体
 - 回転変光星 (~1,000; ~3%)
- 星自身が変動している (intrinsic)
 - 脈動星 (~23,000; ~60%)
 - 激変星 (~800; ~2%)
 - 爆発型変光星 (~3,400; ~9%)
- それ以外
 - AGN
 - 小惑星

注) 本講義では特に断りがない限り、等級に関する記述はV等級とする。

変光星の命名 (GCVS名)

- General Catalogue of Variable Stars (GCVS)
 - 国際天文連合 (IAU) の委託を受けて変光星委員会メンバーが新しい変光星にGCVS名を付ける
 - 新天体発見時にはCBAT (IAU公式の速報記事を発行する部門) からGCVSメンバーに依頼があり、即座に名前が付けられる。
- 命名法
 - 基本: 「(通し番号) + 星座の属格」
 - 星にバイエル名が付いている場合はそのまま (δ Cep など)
 - 明るい順に α 、 β 、、、、A、b、c、、、、z、B、C、D、、、Q、まで
 - RからZまで (R CrB、T Leo)
 - RR、RS、RT、、、、RZ、SR、ST、、、、ZZ
 - AA、AB、、、、QZ (ただし I、Jは使わない)
 - V335、V336、以降、数字が増える

変光星の命名(その他)

- GCVS名は可視光で観測される銀河系内の変光星に対して適用される。
- 超新星の場合「SN(年)(発見順)」
 - 例: SN 1993J (1993年に10番目に発見された超新星)
 - 例: A~Zの後はaa,ab,ac.....
- X線や γ 線で発見される高エネルギー天体の場合、「(衛星ID)(座標)」が使われることが多い
 - 例: XTE J1118+480 (RXTE衛星によって、赤経 11:18:10.76、赤緯 +48:02:12.7 (J2000.0分点)に発見された天体、の意味)
 - 1980年代以前のもものは、B1950.0分点の座標で命名されているものもあるので注意が必要
 - 例: A 0620-00 (Ariel衛星が1970年代に発見したX線連星。B1950.0座標系では(06:20:11.15, -00:19:11.3)だが、J2000.0座標系では(06:22:44.50, -00:20:45.0)
 - 高エネルギー天体でも銀河系内天体で、可視光対応天体が同定された場合はGCVS名がつくことがある
 - 例: A0620-00のGCVS名は V616 Mon
- 最近では可視光観測でも大規模サーベイによって、そのプロジェクト独自の超新星命名が行われることも多い

国内でよく研究されてる変光星

- 超新星 219 ←コンパクトでやる(招待講演:前田さん)
- 激変星 127
- X線連星 105 ←コンパクトでやる (招待講演:牧島さん)
- ガンマ線バースト 99 ←コンパクトでやる (招待講演:固武さん)
- 前主系列星・系外惑星系 61 ←惑星系でやる (招待講演:深川さん)
- ブレーザー 45 ←星じゃないし。。。
- ソフトガンマ線リピーター&anomalousX線パルサー 36
←コンパクトでやる (招待講演:牧島さん)
- 脈動星 33
- 食連星 19
- Be星 16
- Wolf-Rayet星 11

* 過去5年の天文学会年会での発表件数。カウントはとても適当。理論が入ってるものや、入ってないものが混在。例えば、超新星は理論の割合が多い。X線連星やガンマ線バーストは関連する理論を入れるともっと増える。前主系列星は変光星としてよりも、星形成からの観点の観測が多い。

変光星概論

- 食連星
- 脈動星
- 激変星
- Be星と γ Cas型変光星
- Wolf-Rayet星とLBV星

その前に連星系の話

ロッシュポテンシャルとロッシュローブ

- ロッシュポテンシャル (Roche potential)

$$\Phi_R = -\frac{GM(1)}{(x^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{GM(2)}{((x-a)^2 + y^2 + z^2)^{1/2}} - \frac{1}{2}\Omega_{\text{orb}}^2[(x-\mu a)^2 + y^2],$$

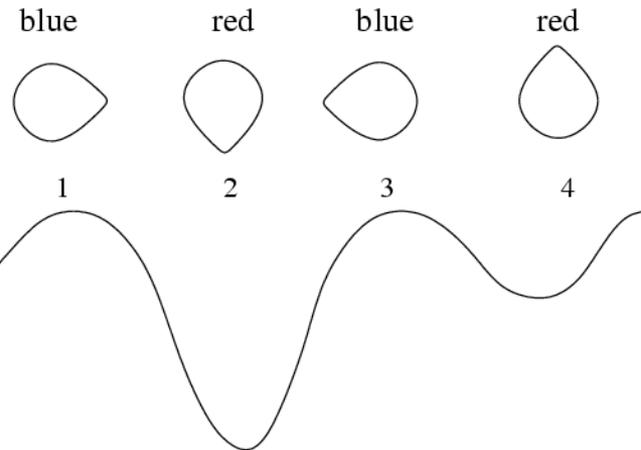
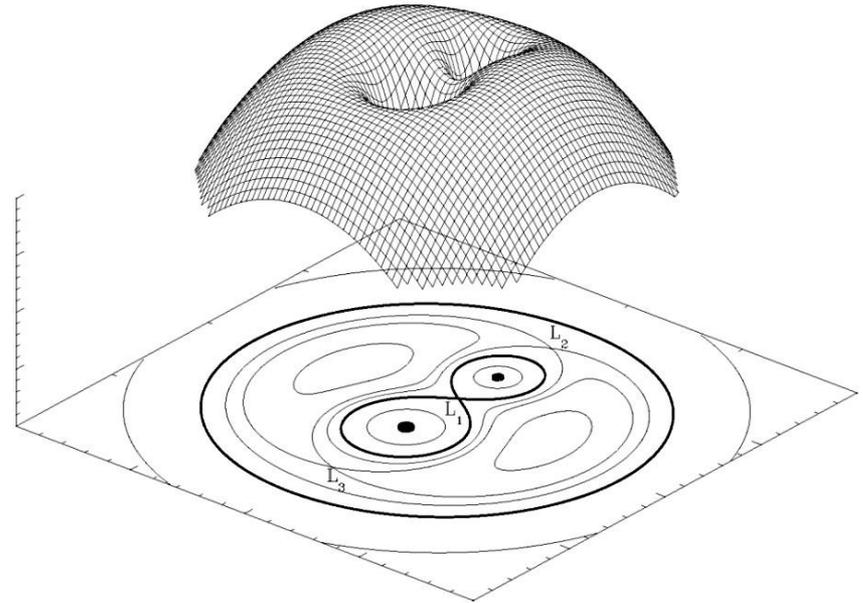
$$\mu = M(2)/[M(1)+M(2)],$$

$$\Omega_{\text{orb}} = 2\pi/P_{\text{orb}}$$

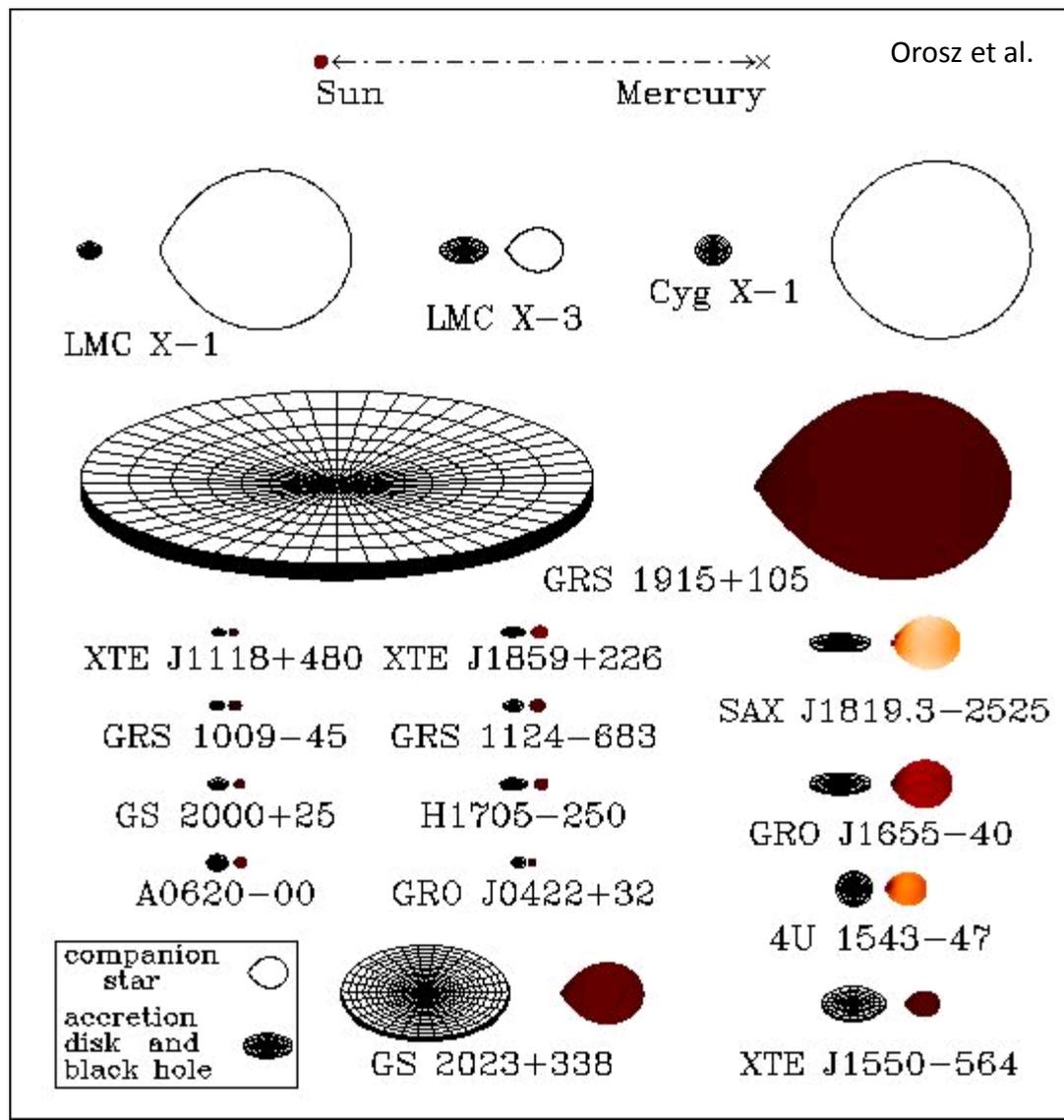
- 重力源と遠心力がつくるポテンシャル
- ロッシュローブ (Roche lobe) = 等ポテンシャル面
- 形状は質量比だけで決まる
- サイズは各要素の質量が決める
- ラグランジュ点
 - L1: 連星間の質量輸送はここから
 - L2: 伴星側
 - L3: 主星側

- 楕円変光 (ellipsoidal modulation)

- ロッシュローブを満たすかそれに近い状態にある星が回転することで見える変光。
- 重力減光 (gravitational darkening) の効果で主極小と副極小ができる。
- 連星質量比と軌道傾斜角で形状が決定する。視線速度曲線と合わせて、質量を含む連星系のパラメータが決定できる。



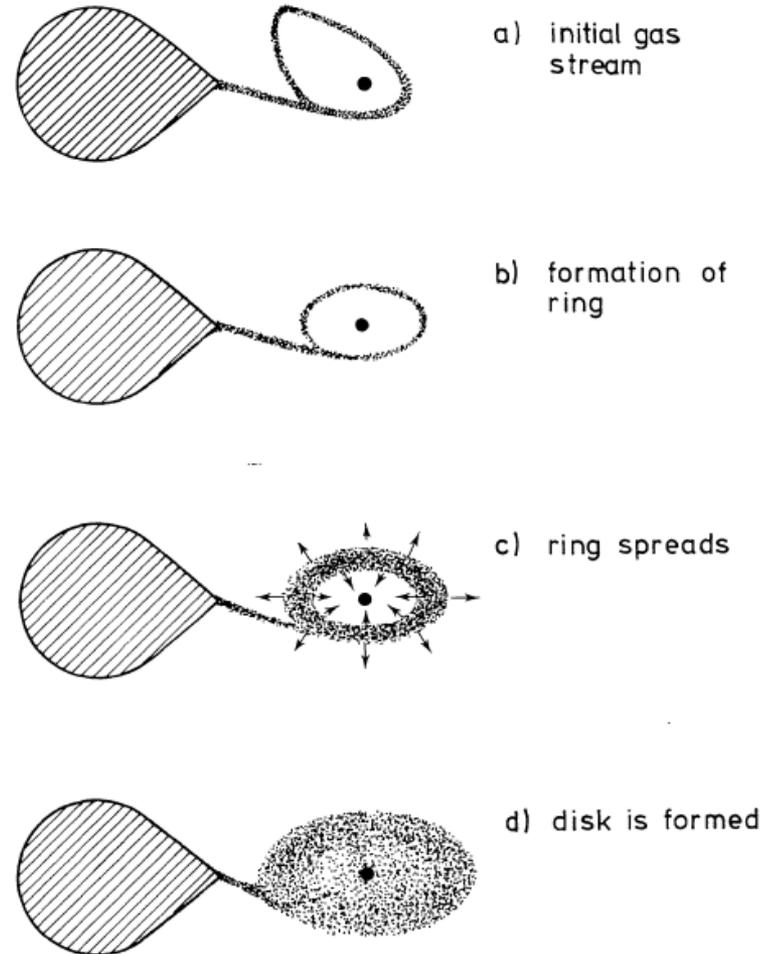
様々なロツシュローブ (X線連星)



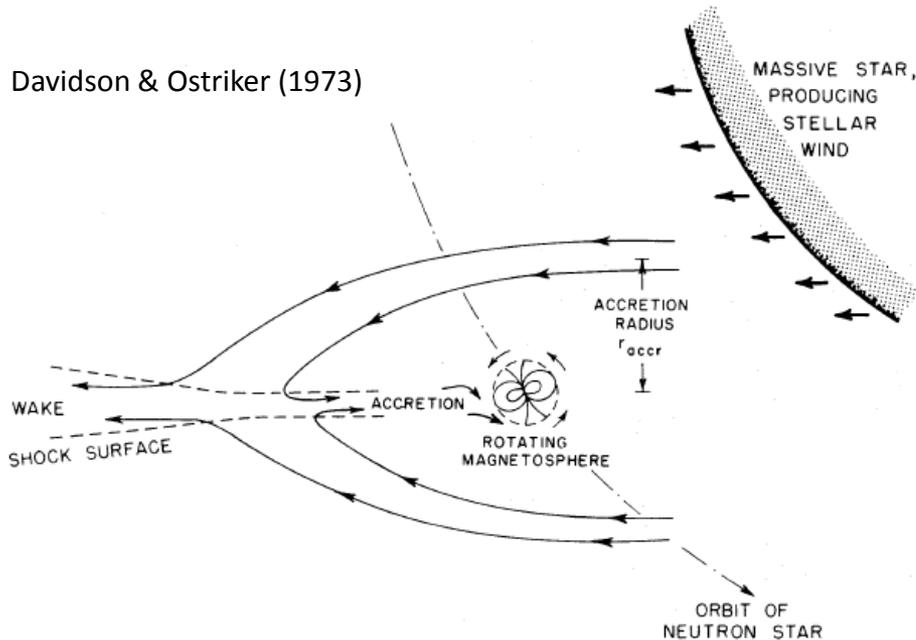
質量輸送過程

- ロッシュローブオーバーフロー (Roche lobe overflow)
 - ロッシュローブを満たした星からL1点を通して相手の星にガスが流れ込む (gas stream)
 - Circularization radius (Lubow-Shu radius; Lubow & Shu 1975) でトーラスを形成
 - 角運動量輸送機構(粘性)が効果的に働けば、降着円盤が形成される
 - 質量降着をうける相手の星の半径が Lubow-Shu半径に近いかそれよりも大きくなると、gas stream は直接相手の星に当たる
 - ロッシュローブオーバーフローの場合、静的に質量降着するため、降着円盤の理論モデルと比較しやすい
- Wind accretion
 - 主にOB型星の非常に強い恒星風の一部が、相手の星の重力に捕えられて降着する。質量放出する側は必ずしもロッシュローブを満たす必要はない
 - 大質量X線連星など

Verbunt (1982)



Davidson & Ostriker (1973)

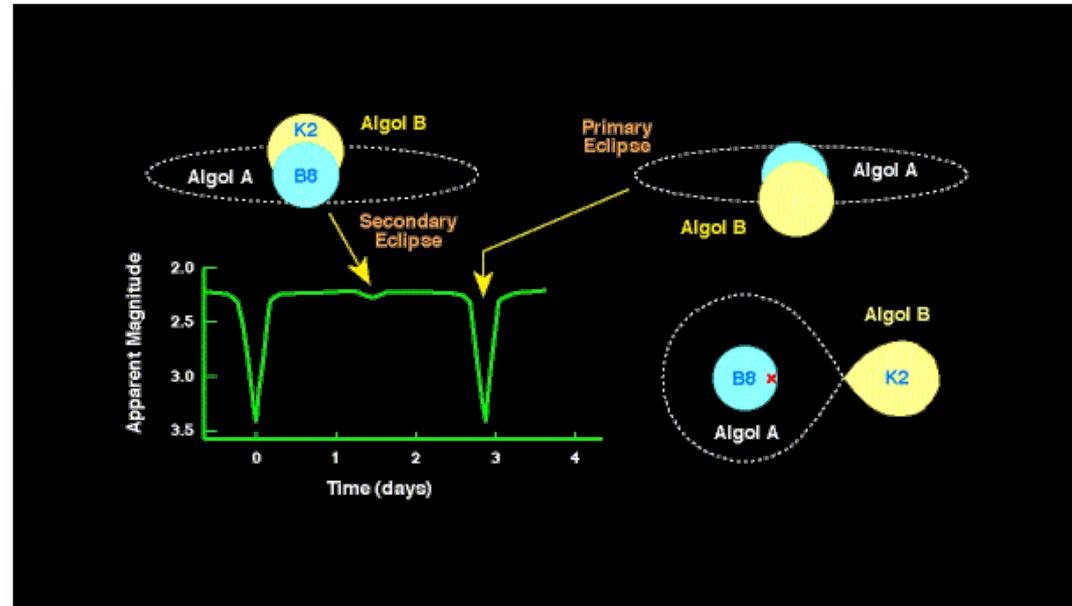
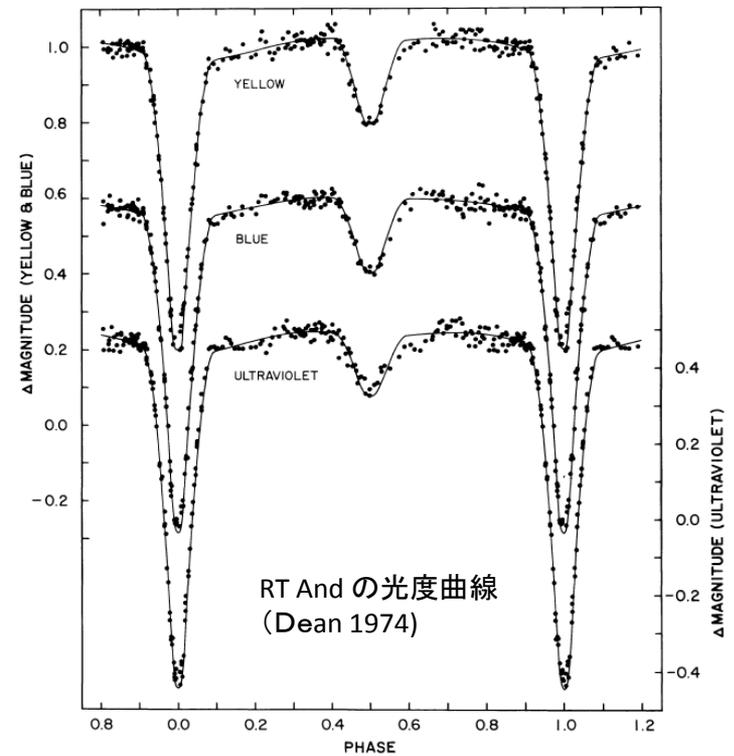


食連星 (eclipsing variables)

- 食連星
 - 最初の発見はアルゴル(ペルセウス座 β 星)で、発見年は1667年。これがミラ(脈動変光星)に次ぐ、2つめの変光星の発見とされる。
- 分類: 光度曲線の形状で分類される
 - アルゴル型 Algol-type (EA)
 - こと座 β 型 Beta Lyrae-type (EB)
 - おおぐま座W型 W UMa-type (EW)

アルゴル型食連星 (Algol-type; EA)

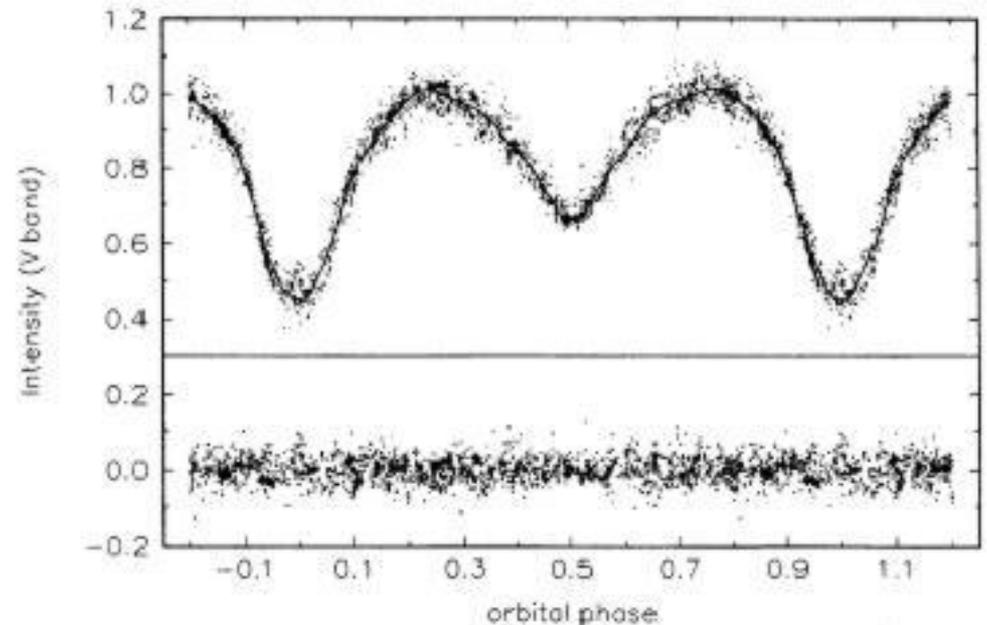
- 光度曲線で定義
 - 食外で平坦
 - 楕円変光や反射成分の寄与が小さい
- 周期: 10時間一数十年
 - 数日周期のものが発見されやすい
- アルゴル
 - K型巨星とB型主系列星の連星系。K型星がロッシュローブを満たして、B型星にガスを流している。
- アルゴルの進化経路
 - 一見すると低質量星であるK型星(伴星)の方が進化が進んでいるように見える。これは、元々は伴星の方が質量が大きく先に進化した結果、その質量の一部が相手の星に移動し、自身は大部分の質量を失い、低質量星になったものと考えられている。



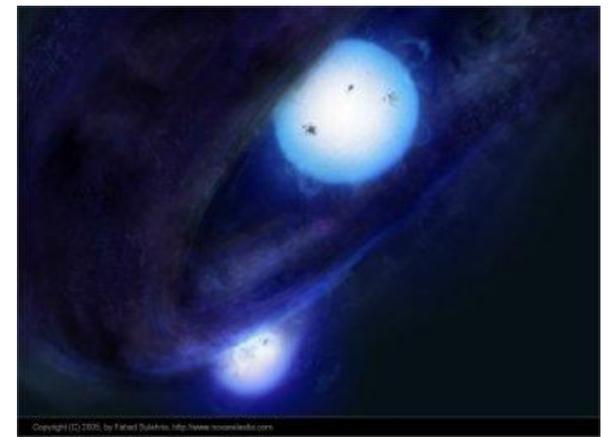
こと座 β 型食連星 (β Lyr-type ; EB)

- 光度曲線で定義
 - 食外でも変光が大きい
 - 楕円変光(ellipsoidal modulation)が強い
 - 主極小と副極小の振幅が異なる
- 周期: だいたい1日以上、100日
- こと座 β 星
 - B型星がロッシュローブを満たし、相手の星(おそらくB型星よりも重い)の周りに降着円盤を形成。円盤によるB型星の食が観測される。

β Lyr の光度曲線 (Harmanec et al. 1996)



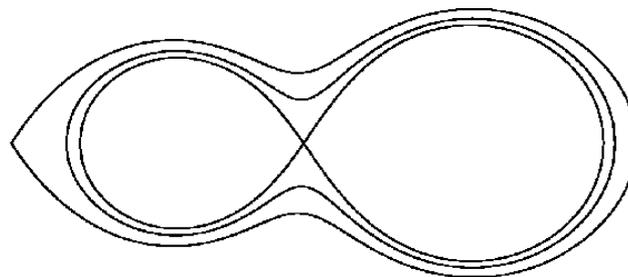
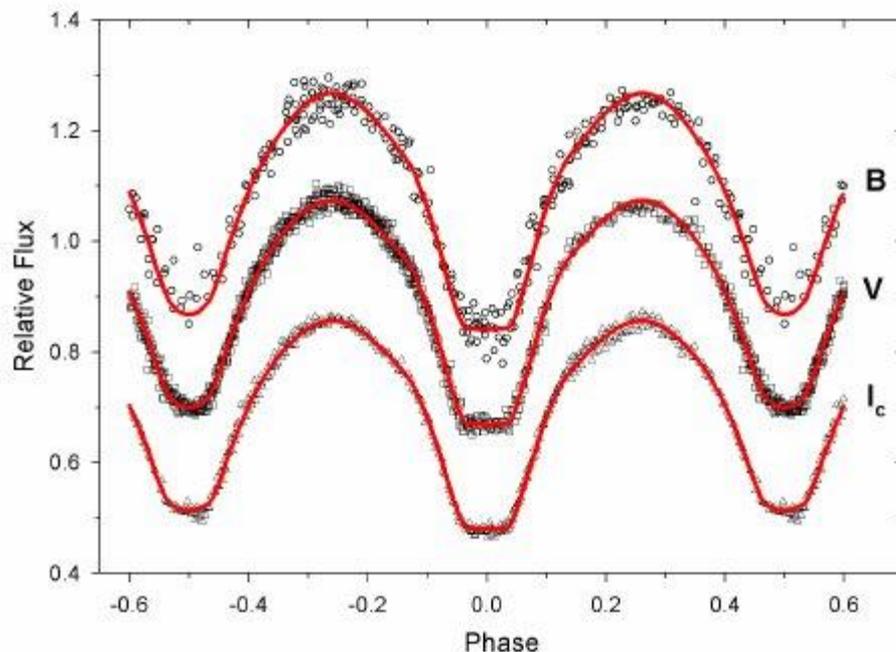
β Lyrの想像図
(Fahad Sulehria)



おおぐま座W型食連星 (W UMa-type; EW)

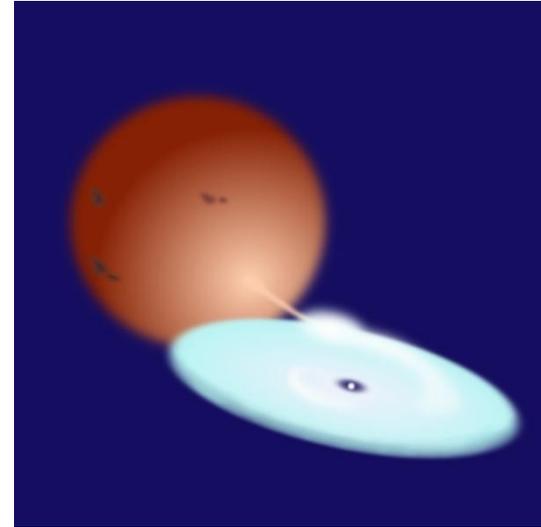
- 光度曲線で定義
 - 食外の変動が大きい
 - 楕円変光が強い
 - 主極小と副極小の振幅がほぼ等しい
 - 接触連星 (contact binary): 共通外層をもって、連星の両成分の表面温度が等しくなる
- 周期: 7時間—1日
 - EA, EBと比べて短い

GW Cncの光度曲線 (Drozd & Ogloza, 2005)



激変星

- 超新星
- 新星
- 新星状天体
- 矮新星
- 強磁場激変星
 - Polar
 - Intermediate polar
- 共生星



- GCVS分類で「激変星」(=cataclysmic variables)と言う場合、超新星や共生星を含む。
- 一方で「白色矮星＋赤色矮星の連星系」として、新星、新星状天体、矮新星、強磁場激変星のみを1つのグループとして扱うこともある。この場合 cataclysmic binaries または、cataclysmic binary variables と呼ばれることもある。また、新星状天体は一般的に大きな変光を示さないが、このグループに分類される。

古典新星と反復新星

新星 (classical nova; N)

- 白色矮星表面に降り積もったガスがある臨界密度を超えると水素の核融合が始まり、その反応が白色矮星表面で暴走し、表面の大量のガスを吹き飛ばす現象。
- 増光幅10等以上、爆発の継続時間数か月〜数年

反復新星 (再帰新星、回帰新星、再発新星: recurrent nova; NR)

- 2回以上の新星爆発が観測された天体。
- 10年〜数十年の爆発サイクル

光度曲線の特徴と分類

- 減光速度 (極大から3(2)等暗くなるまでの時間: $t_3[t_2]$) で分類される
- Fast nova (NA): $t_3 < 100$ days (反復新星は全て fast nova)
- Slow nova (NB): $t_3 > 150$ days

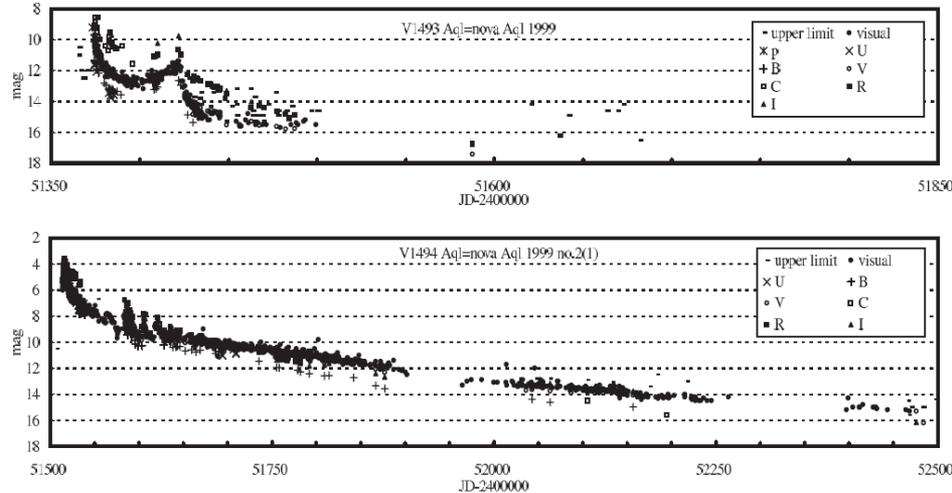
スペクトルの特徴

- 強く幅広い輝線: 速度 ~ 1000 km/s、EW数百〜1000
- P Cygni-profile: 膨張ガスの証拠

Ia型超新星との関係

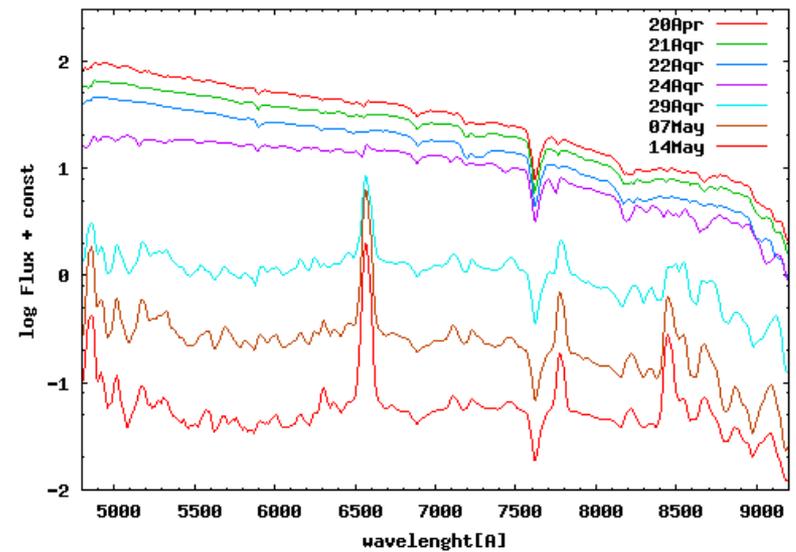
- 新星はIa型超新星の候補天体 (白色矮星の質量がチャンドラセカール限界 (1.38 M_{\odot}) を超えると崩壊し、Ia型超新星になる)
- 新星爆発のたびに、白色矮星は「削られる」か、「太る」か?
- 白色矮星の質量が大きいほど少ないガスで爆発できるため、チャンドラセカール限界に近い天体は反復新星であると考えられている。例えば、反復新星 U Sco では、光度曲線のモデルフィッティングから、白色矮星の質量が1.37 M_{\odot} で、限界に近いとされている (Hachisu et al., 2000, ApJ, 528, L97)。

古典新星の光度曲線。上: V1493 Aql、下: V1494 Aql (Kiyota et al., 2003, PASJ, 56, S193)



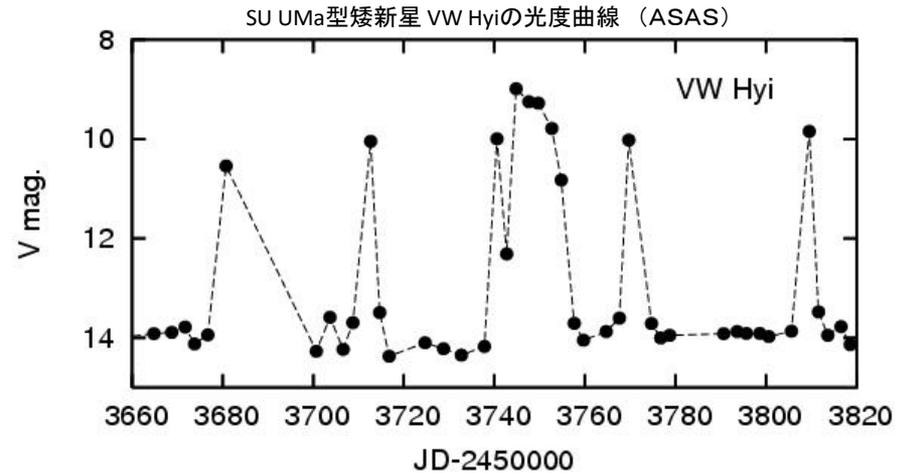
古典新星 V5579 Sgr のスペクトル。観測: 新井。機材: TRISPEC/かなた望遠鏡

V5579 Sgr (=Nova Sgr 2008)

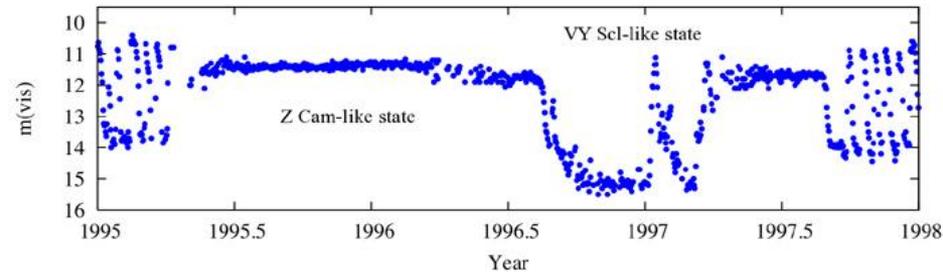


矮新星と新星状天体

- 矮新星 (dwarf nova; UG; U Gem型変光星)
 - 降着円盤の不安定性で、一時的に質量降着率が上昇して明るくなる(アウトバースト)。
 - 増光幅: 3-9等級、爆発の継続時間: 数日、爆発頻度: 数週間-数年に一回
 - Standstill: アウトバーストと静穏時の中間の明るさが継続する現象。継続時間は数週間-数か月。Standstillを起こすものをZ Cam型 (UGZ)と呼ぶ。
 - スーパーアウトバースト: 連星軌道周期が3時間以下の矮新星にのみ観測される。増光幅、継続時間ともにノーマルアウトバーストより大きい。スーパーハンプと呼ばれる振幅0. 数等の周期変動が観測される。スーパーハンプ周期は連星軌道周期よりも数%長い。
 - スーパーアウトバーストを起こすものをSU UMa型 (UGSU)、おこさないものをSS Cyg型 (UGSS)とも呼ぶ。
 - 矮新星のスペクトル: 静穏時は水素やヘリウムの輝線が卓越し、降着円盤を真横から見ているような天体ではダブルピークの形状→降着円盤の証拠。アウトバースト時は輝線が弱くなり、吸収線に変わることもある→光学的に厚い円盤。
 - X線トランジェントも同じ爆発機構だと考えられている。
- 新星状天体 (NL: novalike variables)
 - スペクトルの特徴が、古典新星の静穏時のものに類似。
 - 変光幅は大きくないものの、0. 数等の変光が観測される。
 - スペクトルで円盤風が見えるもの、突発的に暗くなるもの、等、サブグループが存在。



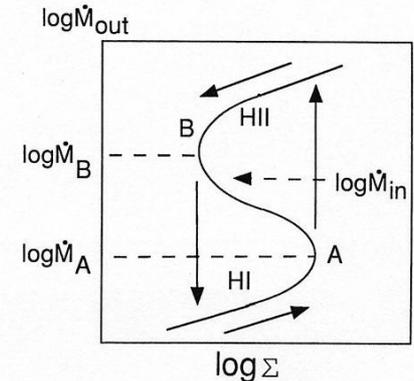
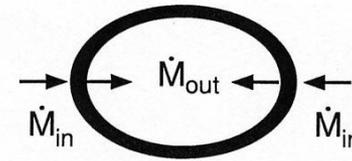
Z Cam型矮新星 RX Andの光度曲線。VY Scl (NL) のような減光も見える (AAVSO)
RX Andromedae (1995-1998)



円盤不安定性理論 (disk instability theory)

- 熱的不安定性 (thermal instability)

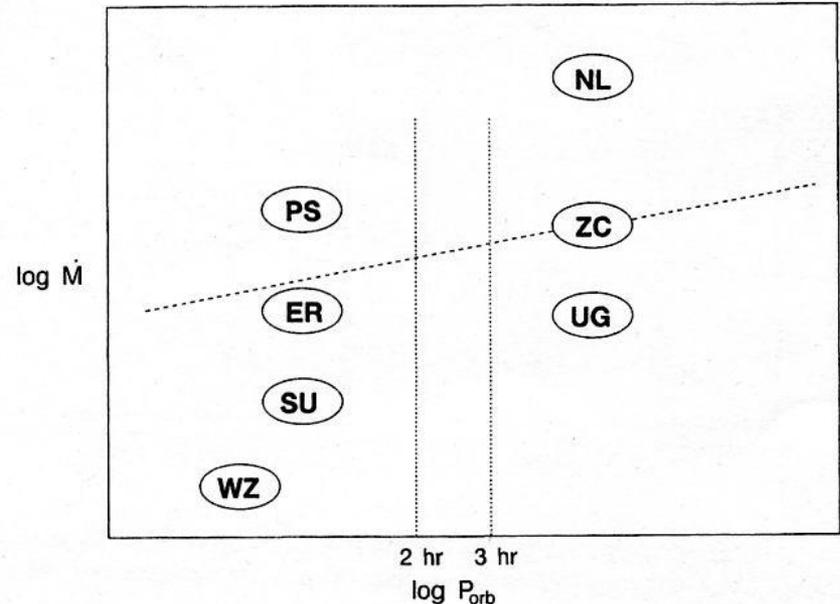
- 2つの安定な熱平衡状態
- 完全電離状態: 温度1万度程度。粘性係数が大きいので、質量降着率が高い。光学的に厚いと考えられ、標準円盤モデルが期待される。
- 中性状態: 温度が低く、水素は中性。粘性が低く、質量降着率が低い。



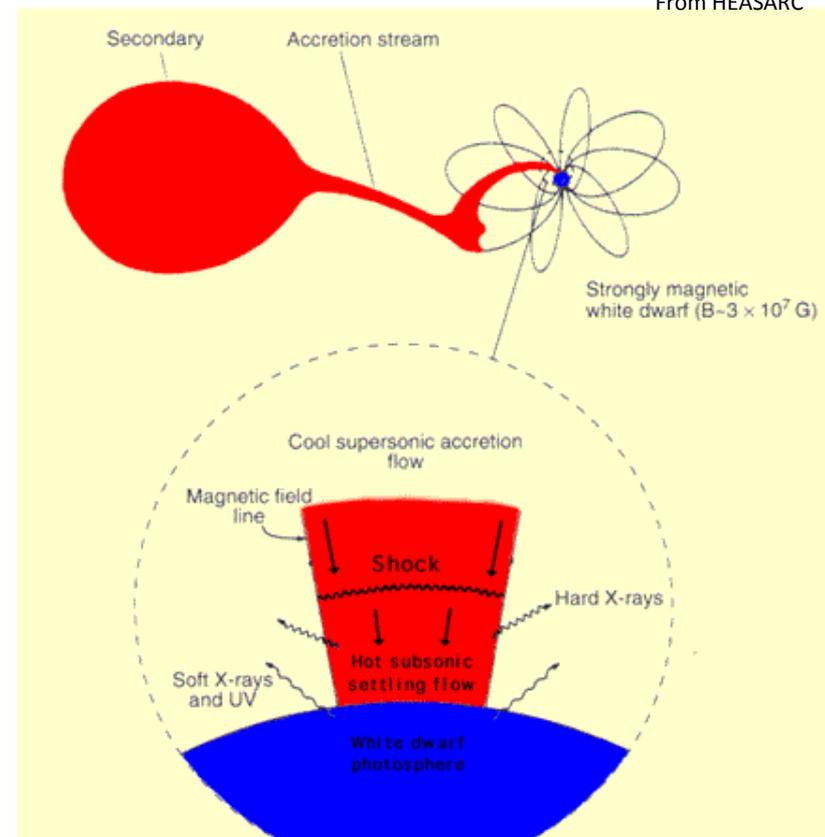
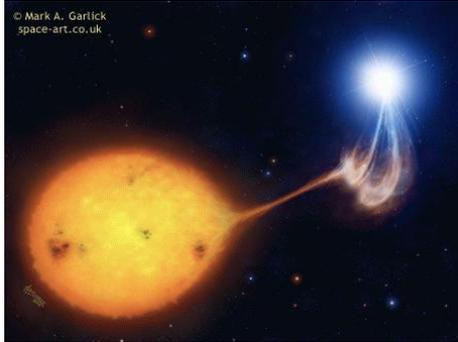
- 潮汐不安定性 (tidal instability)

- 円盤のもつ角運動量が多い=円盤サイズが大きい時、3:1 resonance 半径で働くとされる不安定性。
- 円盤は楕円形に変形し、通常よりも大きなトルクが円盤にかかることで、より高い質量降着率が期待できる。

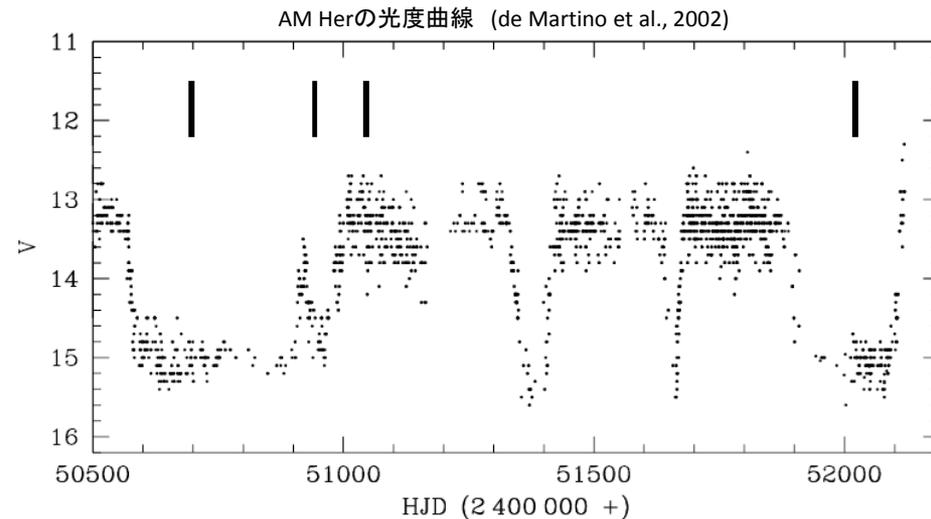
(Osaki 1996)



強磁場激変星 (magnetic-CV)



- ポーラー (polar; AM Her型; AM)
 - 白色矮星のスピンの連星軌道周期が一致
 - 降着円盤起源の輝線がない
 - High state と low state 間を推移。質量輸送率の増減が原因と考えられている。
 - 白色矮星表面の磁場は 10^7 - 9 G。
- 中間ポーラー (intermediate polar)
 - 白色矮星のスピンの観測されるが、軌道周期とは異なる周期
 - 降着円盤が(おそらく途中まで)存在
 - 矮新星アウトバーストを起こすものもある
 - 白色矮星表面の磁場は 10^6 - 7 G。
- Accretion column
 - 白色矮星表面近くのX線放射領域。
 - 衝撃波で硬X線、熱化した白色矮星表面から軟X線と紫外線が放射。
 - スペクトルではサイクロトロン放射が観測され、強い偏光をもつ。



脈動変光星

脈動変光星

- 脈動変光星の中で最初に発見された(周期的な変光星として認識された)のは、ミラ(くじら座 α 星)。周期は約330日。変光幅は極大で2等、極小で10等台と非常に大きい。

分類

– (広義での)セファイド (CEP)

- Classical Cepheid (δ Cephei; DCEP): タイプI。FGK型星。HR図上の水平分岐(Horizontal branch)上の天体。周期1–135日、振幅: <2等。動径脈動。北極星もこの分類に入る。
- W Vir (CW): タイプII。周期: 0.8–35日、振幅: 0.3–1.2等。 δ Cephei の種族II版で、周期–光度関係が異なる。
- RR Lyrae: タイプII。AF型巨星。Horizontal branch上の天体で、球状星団のHR図で有名。周期: 1日以内。振幅0.2–2等。脈動周期の他に、10-100日の周期で光度曲線の形状が変化する「Blazhko効果」が存在する。
- β Cephei (BCEP): タイプI。OB型主系列星。周期0.1–0.6日、振幅: 0.01–0.3等。ほとんどは動径脈動。多重周期。
- SPB: slowly pulsating B stars。周期1-3日。Waelkens (1991) で報告。
- δ Scuti (DSCT): タイプI。A-F型星。周期0.01–0.2日、振幅: 0.003–0.9等。動径・非動径脈動の両方が観測される。
- SX Phe (SXPHE): タイプII。 δ Sctの種族II版とされる。周期–光度関係が異なる。
- ZZ Ceti (ZZ): 白色矮星。非動径脈動。周期30秒–25分。振幅0.001–0.2等。白色矮星のスペクトル分類に従って、DAV(水素の吸収線)、DBV(ヘリウムの吸収線)と記述されることもある。
- RV Tau (RV): タイプII。FG–KM型超巨星。周期30-150日、振幅3-4等。光度曲線中、主極小と副極小が交互に現れるのが特徴。

– 不規則変光星 (L)、semiregular variables (SR)

– ミラ型 (M)

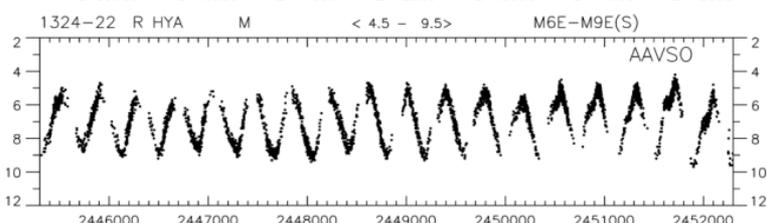
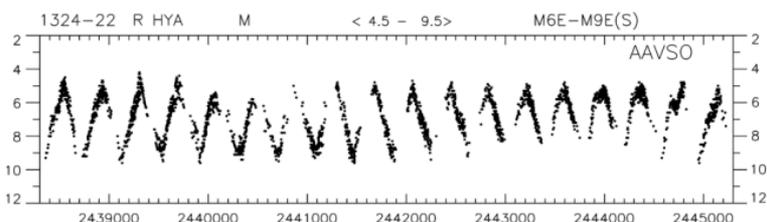
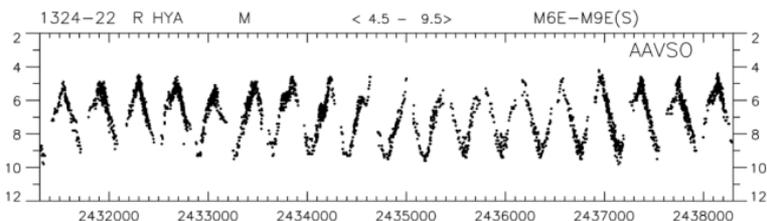
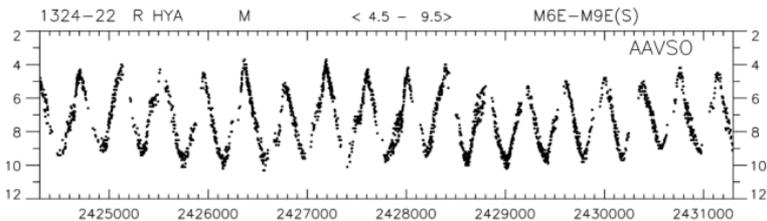
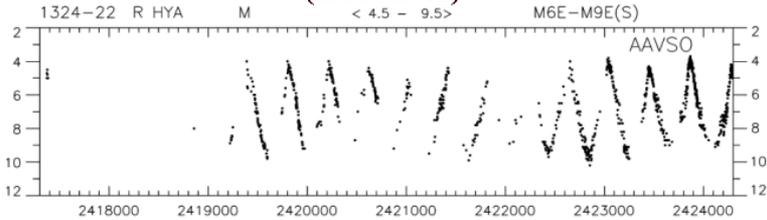
- 周期80日–1000日: long period variables (LPV): 赤色巨星。振幅2.5–11等。

タイプI セファイド と タイプII セファイド

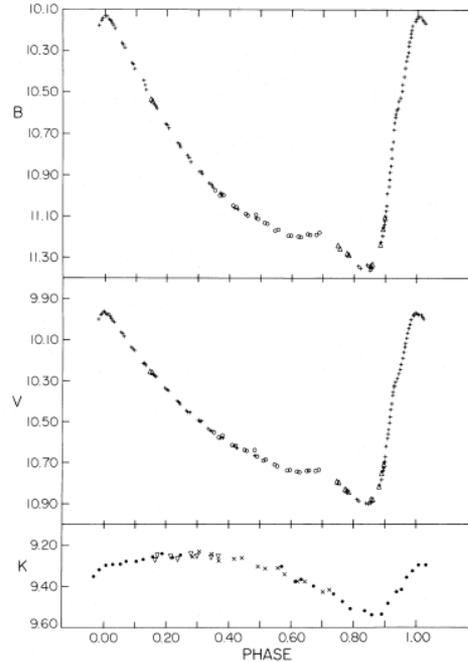
- 周期光度関係が異なる(定義) →金属量の差による opacityの差が原因
- タイプIの特徴: 銀河円盤内に多く、金属量の多い天体
- タイプIIの特徴: 球状星団や old disk populationに多く、金属量の少ない天体

光度曲線の例

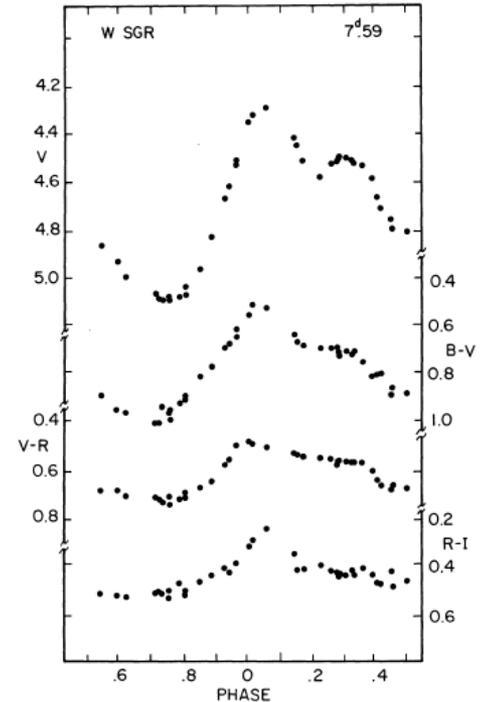
1324-22 R Hydrae
Observations from the AAVSO International Database
(1906 - 2001)



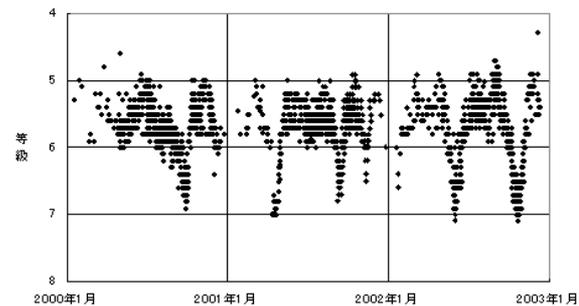
SW Dra (RR) (Jones et al. 1987)



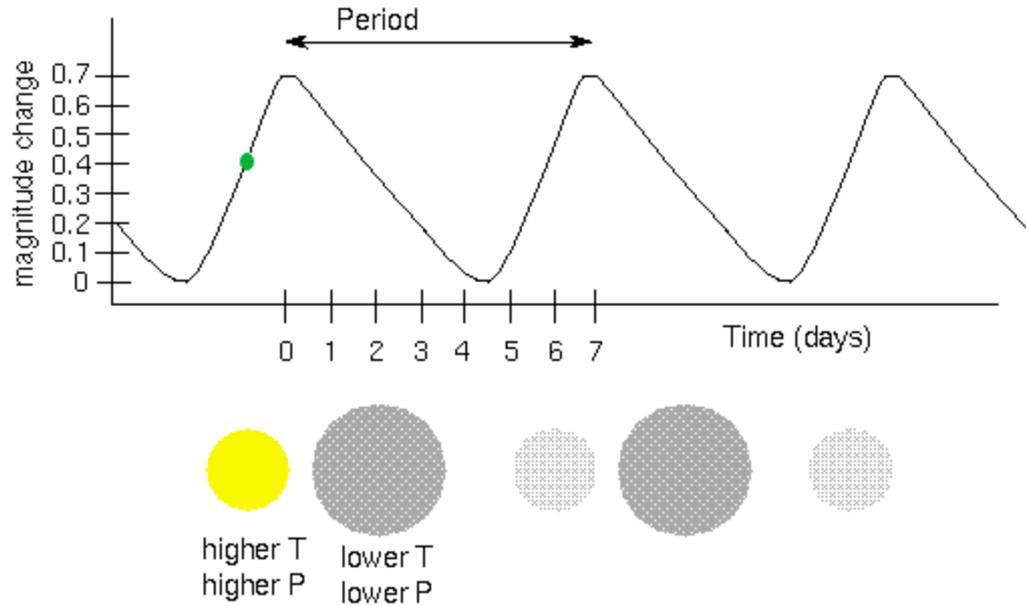
W Sgr (CEP) (Moffett et al. 1980)



R Sct R Sct (RV) (VSNET)



動径脈動 (radial oscillation) の原理



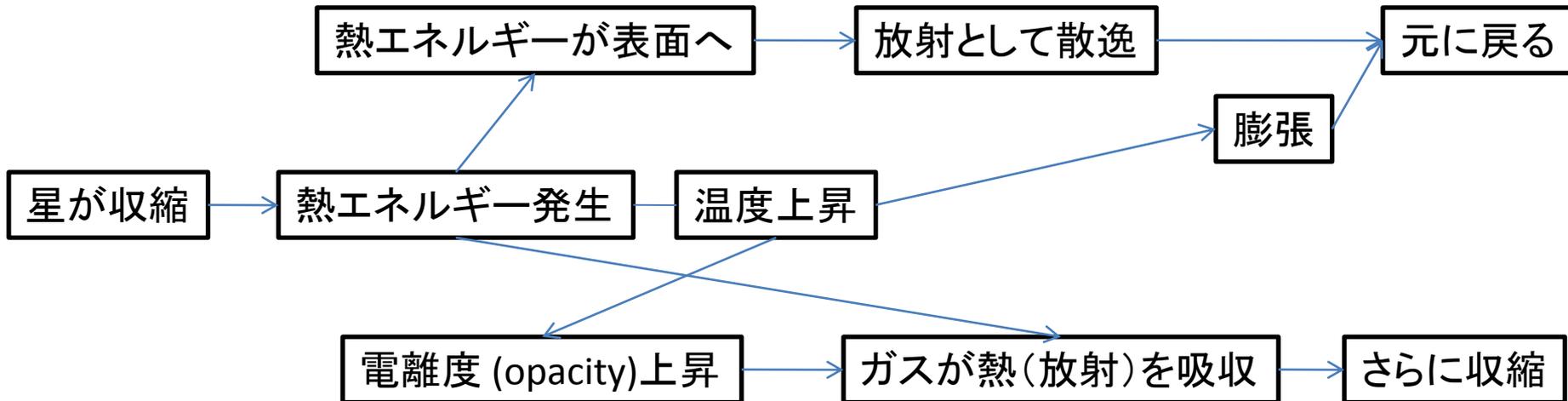
Cepheid variables: outward pressure (P) and inward gravity compression are out of sync, so star changes size and temperature: it **pulsates**.
RR-Lyrae variables are smaller and have pulsation periods of less than 24 hours. Also, their light curve looks different from the *Cepheid* light curve.

κ機構

- κ(カッパ)は opacity を表す記号
- δ Cephei, RR Lyr など、instability strip 中の脈動星を説明できる。これらの天体では、ヘリウムの部分電離ガス起源の電子が opacity の主な役割を果たしている。
- β Cephei などより温度の高い天体では鉄イオンが中心的な役割を果たしていると考えられる。
- ミラがκ機構で説明できるかどうかはまだ議論されているところ。

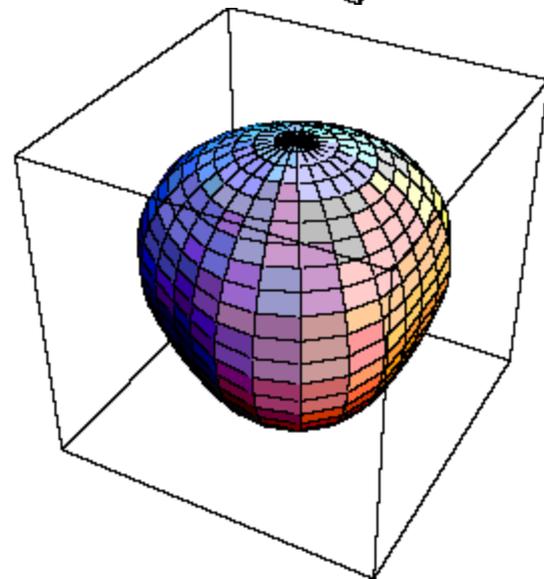
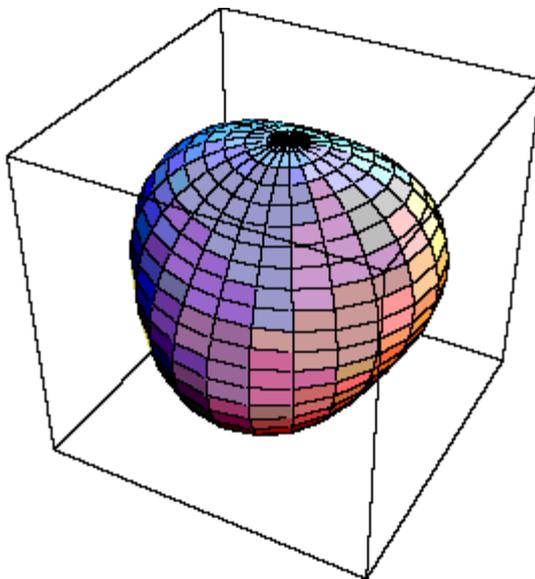
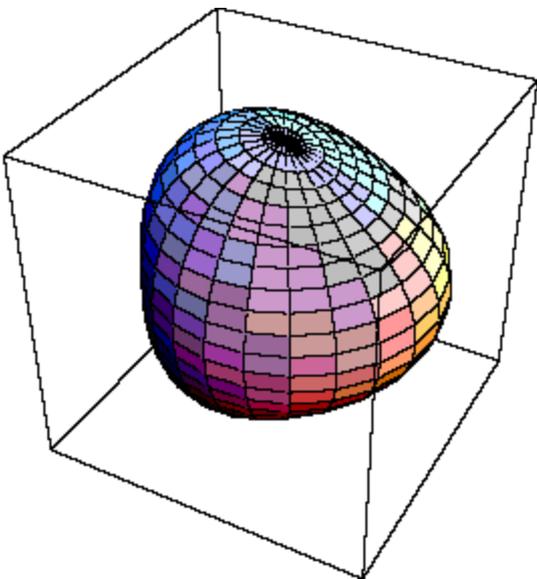
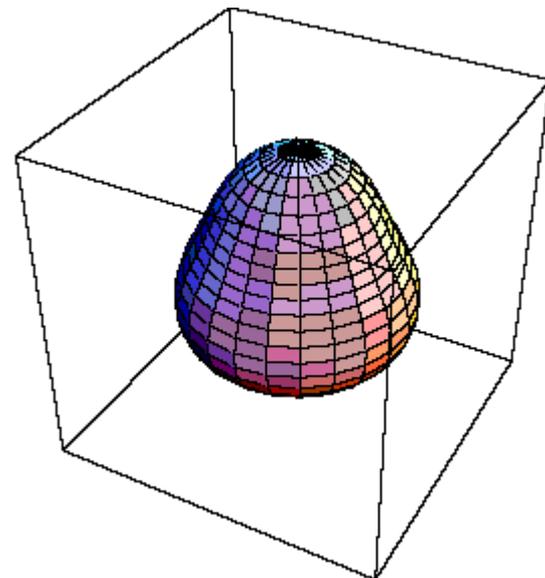
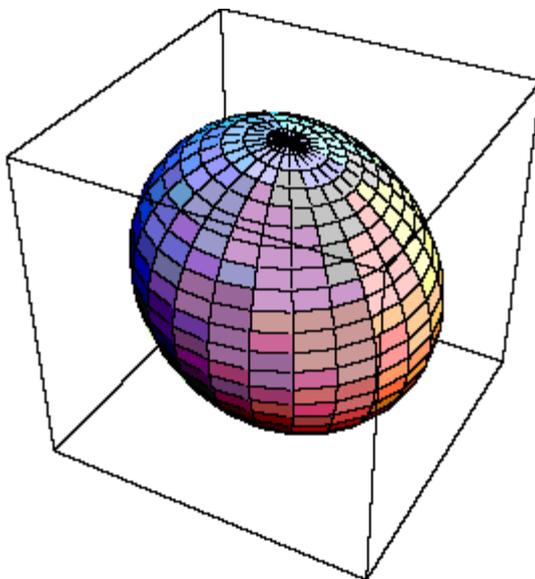
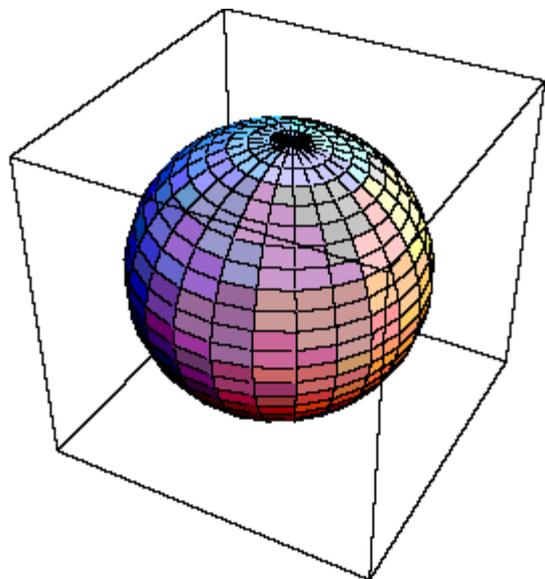
ε機構

- 膨張・収縮による星内部の発熱量の変動を考えたモデルで、脈動星の機構としてκ機構よりも早い時期に議論された。

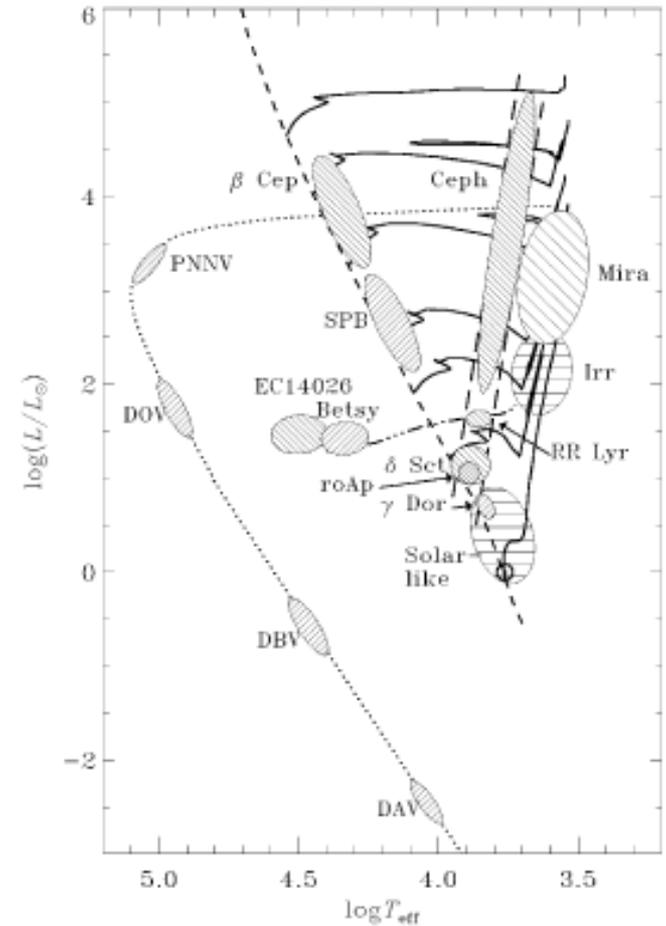
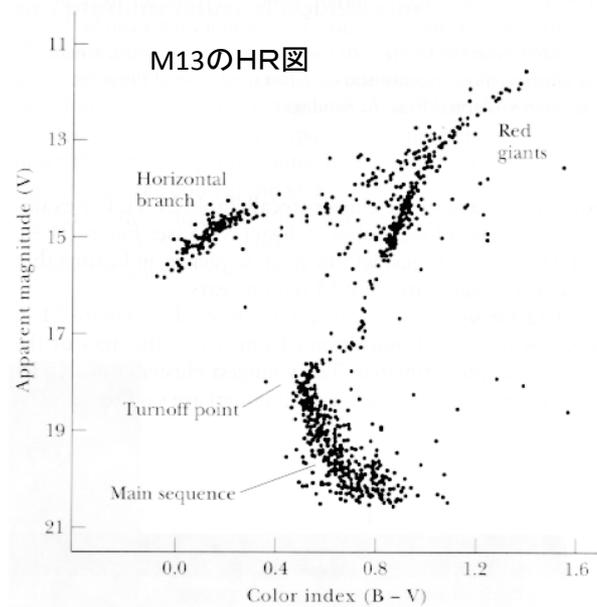


(おまけ) 非動径脈動 (non-radial oscillation)

(by Tim Bedding)



セファイド不安定帯 (Cepheid instability strip)



- 球状星団のHR図で発見
 - Horizontal branch 上で星が存在しない(少ない)部分に相当する
- Instability strip より青側では温度が上昇するため、星表面が部分電離ガスにならない。逆に、赤側では対流層が大きくなるため、 κ 機構が効かなくなる。

周期—光度関係 (period-luminosity relation; PL-relation)

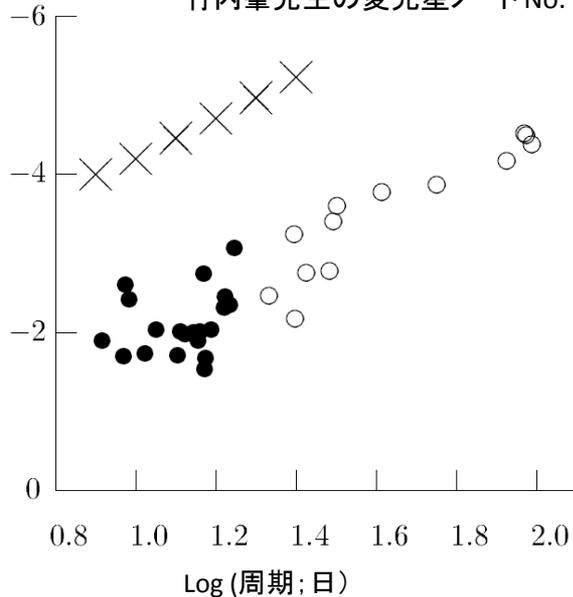
周期—光度関係

- 長周期の天体ほど絶対等級が明るくなる
- 周期から天体の絶対等級が推測できるため、距離の指標に用いられる
- タイプIとII セファイドでは周期—光度関係が異なる
- 銀河系内タイプIセファイドの周期—光度関係 (Feast & Catchpole 1997; Hipparcosの三角視差データを使って)

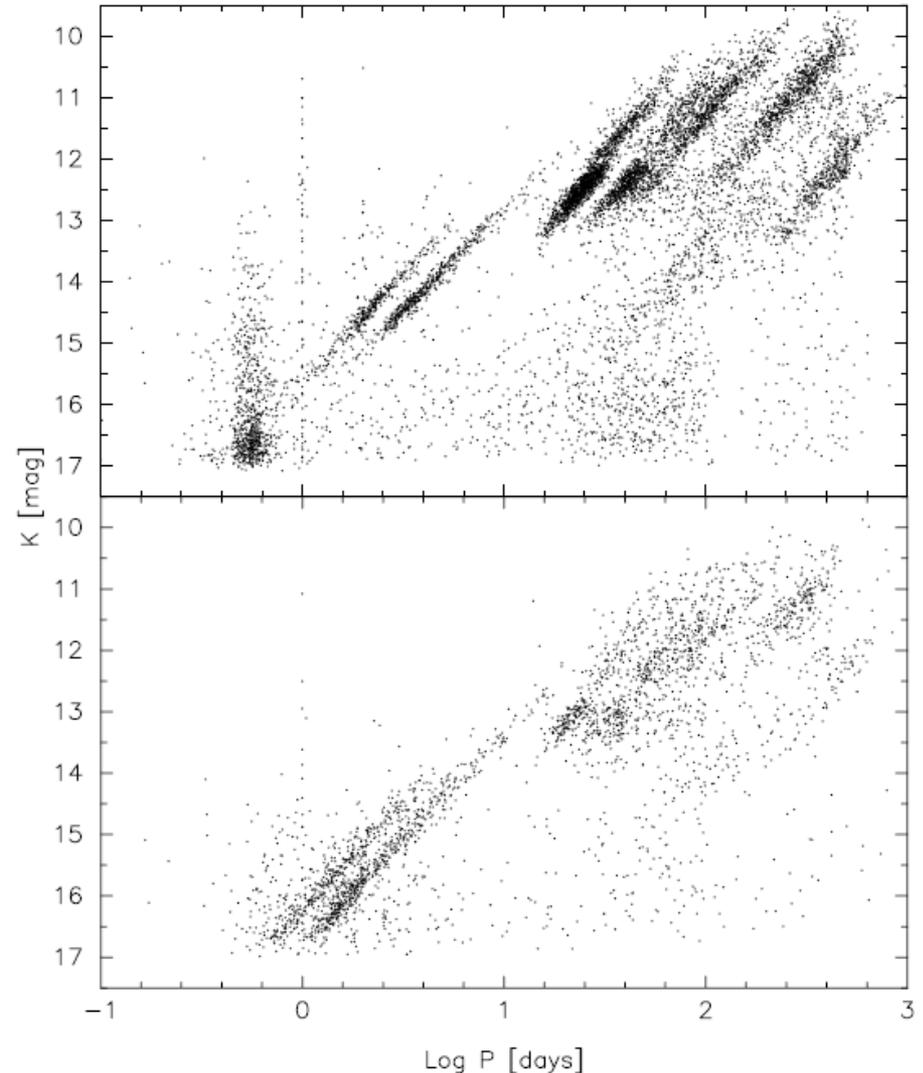
$$M_v = -2.81 \log(P_{\text{days}}) - 1.43$$

実視絶対等級

竹内峯先生の変光星ノート No. 2 より



LMC, SMCの脈動星の周期—K等級関係 (Ita et al., 2004)

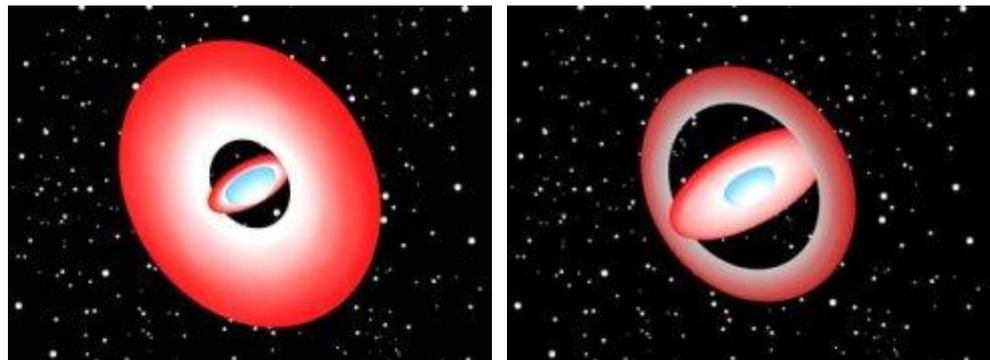


以上、古典的メジャー変光星3種
(食連星、脈動星、激変星)でした。

以降はその他の変光星たち

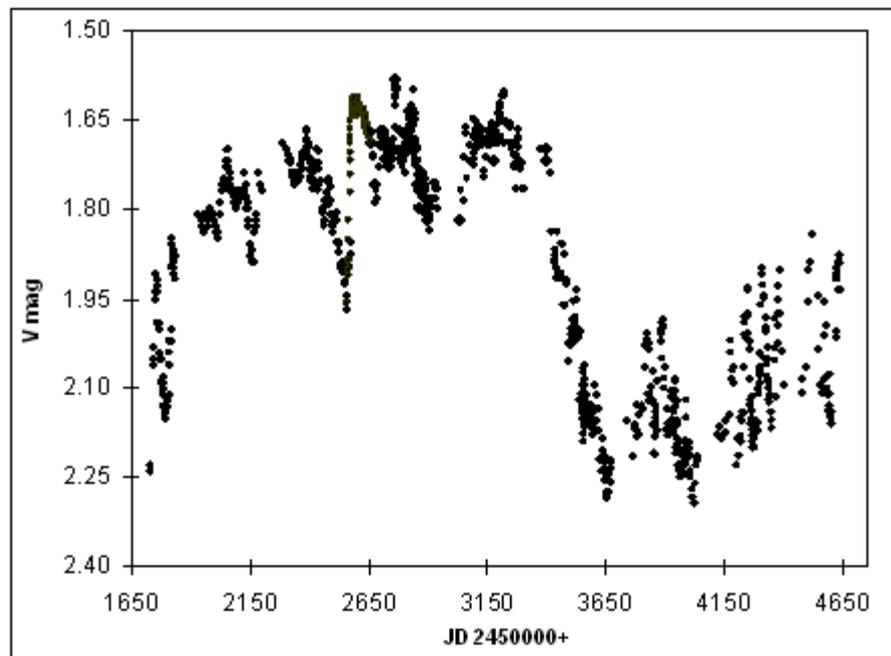
γ Cas (GCAS; Be星)

Be星プレオネの想像図。左:2005年12月。右:2007年2月
(西はりま天文台)

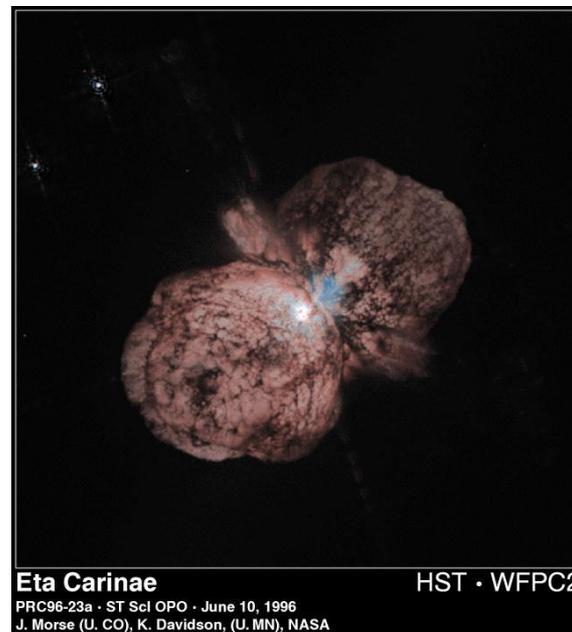
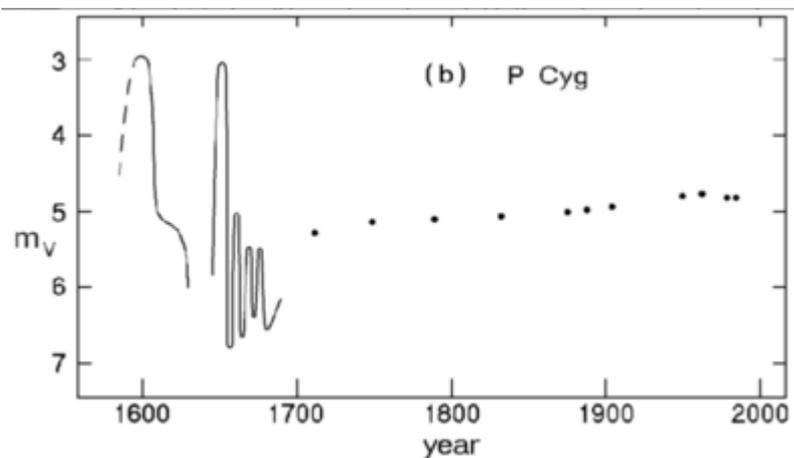


- (classical) Be星
 - 輝線をもつB型主系列星
 - 輝線プロファイル(=星周円盤)が大きく変動する
 - 似て非なる天体
 - B[e]星: 禁制線が見える。巨星。
 - Herbig Ae/Be星: 前主系列星。赤外超過がある(ダスト円盤)
- γ Cas型変光星
 - 数か月一数十年(以上)のタイムスケールで、1等程度変光する。増光のタイムスケールは比較的短いことが多く、erruptive variables に分類される。
 - 光度変動と輝線プロファイルの変動から、高速自転するBe星の赤道付近で、遠心力が重力より勝ることによって表面が外側へ流れ出し。ガスはリング状や円盤状になると考えられている。
 - δ Sco の増光: 2000年にさそり座 δ 星が γ Cas型の増光をおこし、星座の印象を変えた。
- 脈動星としてのBe星
 - HR図上で β Cepheiと似た位置に存在し、同様の脈動由来の変光が観測される

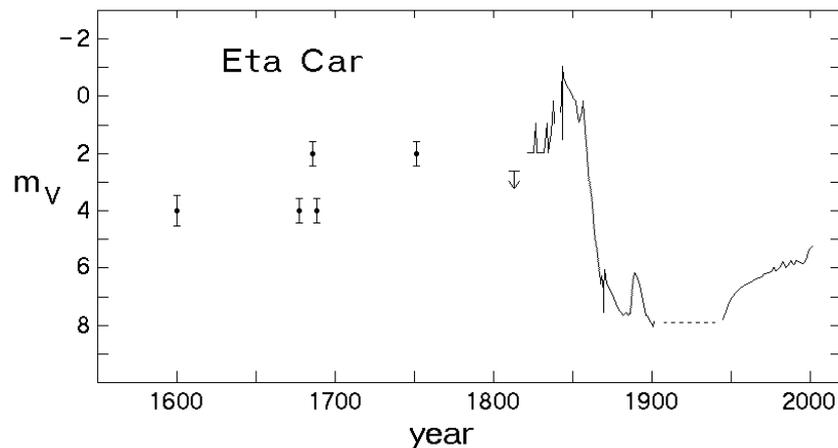
δ Scoの光度曲線 (S. Otero)



Luminous blue variables (LBV; SDOR, S Dor型)

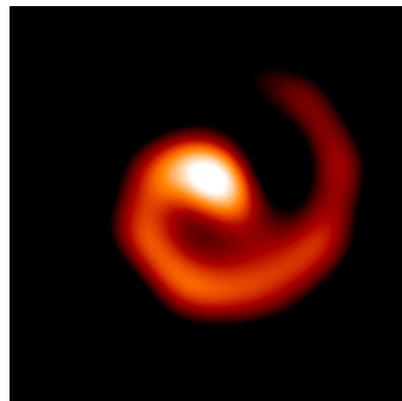


- HR図上で最も明るく青い位置にあり、強い恒星風に起因した変光が見える
 - Luminosity = 10^{39-40} erg/s: 古典新星と超新星の間に位置する
 - 星の質量は10-100 M_{\odot} 程度で、一部は最も重い恒星。生まれると同時に外層がsuper Eddingtonになっていると考えられ、強い恒星風がでる。
 - 間欠的に大きな質量放出が起こり「爆発」として見える
 - 変光のタイムスケールは数十日-数百年
 - Hypergiant とも呼ばれる
 - スペクトルでは水素、ヘリウムの P Cyg profile が特徴的
 - 周辺にシェルや星雲が見えるものも多い
- S Dor
 - S Dor型のプロトタイプ。
- P Cyg
 - P Cygni-profile で有名な天体
- η Car
 - 19世紀半ばに大爆発を起こし、その際に現在観測される星雲の元となる物質が放出されたとされる。



Wolf-Rayet星 (WR)

- 水素の外層がなくなった大質量星で、恒星風の変動に起因する変光が観測される
 - 有効温度30000-50000Kで、スペクトルに水素が弱く、代わりにC,N,O, He, Siの輝線が強い
 - LBVの外層がなくなった後、もしくは、通常の大質量星が進化したもの、と考えられている
 - C,Oが比較的強いものをWC、He,Nが強いものをWNと分類する
 - 重力崩壊寸前の天体
 - 変光振幅は通常1等以下
 - まれに大きく速い変光を示すものがある
 - WR 104 (pinwheel star)
 - Keck望遠鏡の近赤外線AO観測で天体の構造とその変化が直接撮像された天体。
 - 可視域では大きな変光が観測されている



Interacting Binary Wind Model of Spiral Outflow Around WR 104

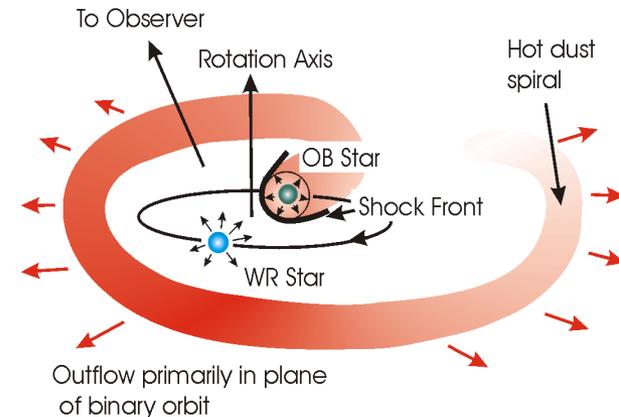
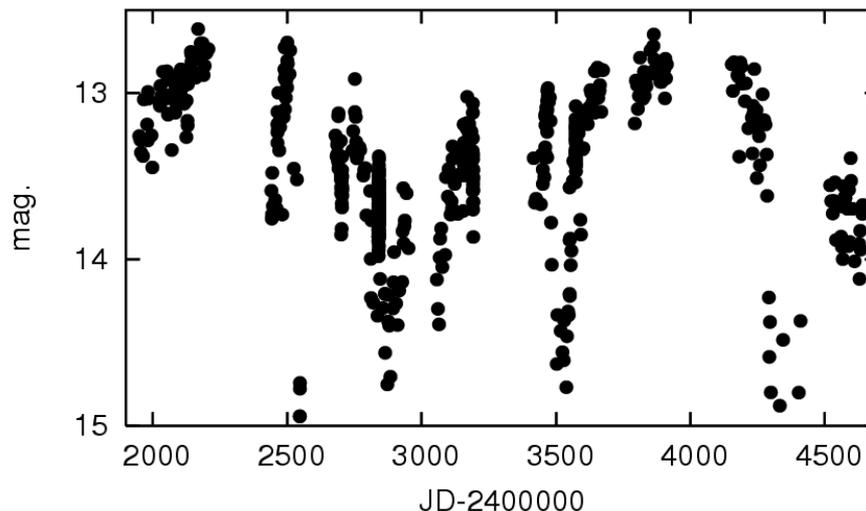


Photo Credit: U.C. Berkeley Space Sciences Laboratory/W.M. Keck Observatory

WR 104 の光度曲線 (ASAS-3)



ここからは時間ある限り、、、

- 国内でよく研究されてるけど他のセッションで扱うから飛ばした変光星たち
 - 超新星
 - X線連星
 - ガンマ線バースト
 - 前主系列星・系外惑星系
 - ソフトガンマ線リピーター
 - マイクロレンズ天体
- 国内ではあまり聞く機会が少ないけど面白い変光星たち
 - フレア星
 - 前主系列星 (T Tau, Herbig Ae/Be)
 - R CrB型
 - Secular Variables (桜井天体)
 - V838 Mon
 - 回轉變光星

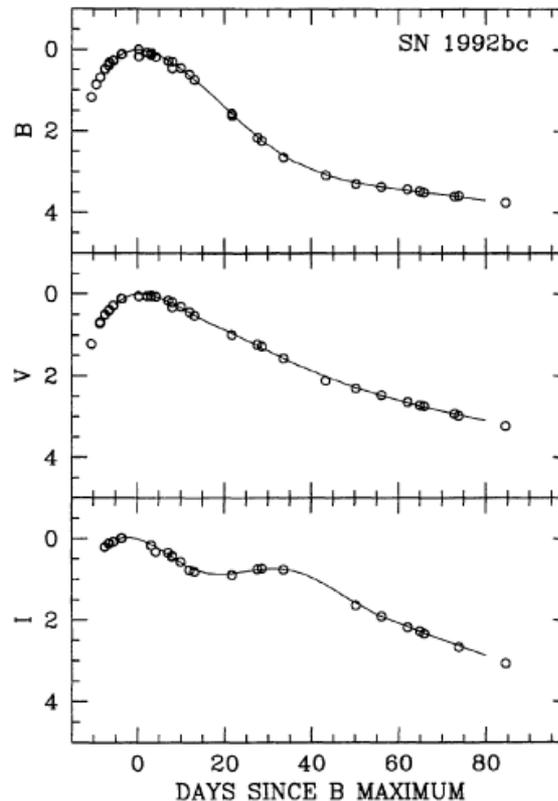
超新星

熱核暴走反応型 (Ia型)

- 白色矮星がChandrasekhar限界質量(約1.4 M_{\odot})を超える
- 距離指数として: 減光率が大きいものほど暗い。
- 前駆天体が不明: Single/double degenerateモデル
- 爆発機構が不明: 亜音速の爆燃波、超音速の爆轟波

重力崩壊型 (Ib, Ic, II型)

- 大質量星(8- M_{\odot} 以上)の最期: 鉄の核 \rightarrow 不安定化
- r(rapid)過程での元素合成: 中性子捕獲 \rightarrow β 崩壊
- 衝撃波の表面への伝搬が未解明

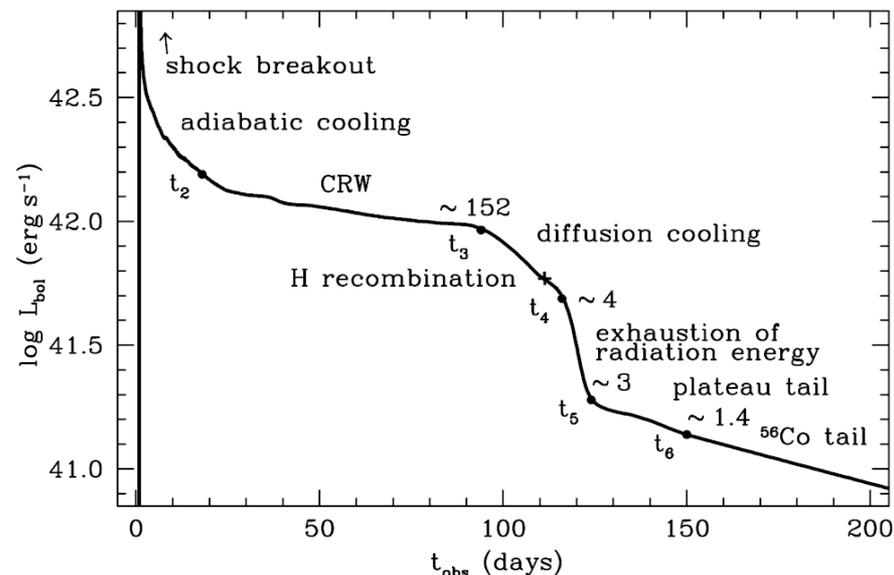
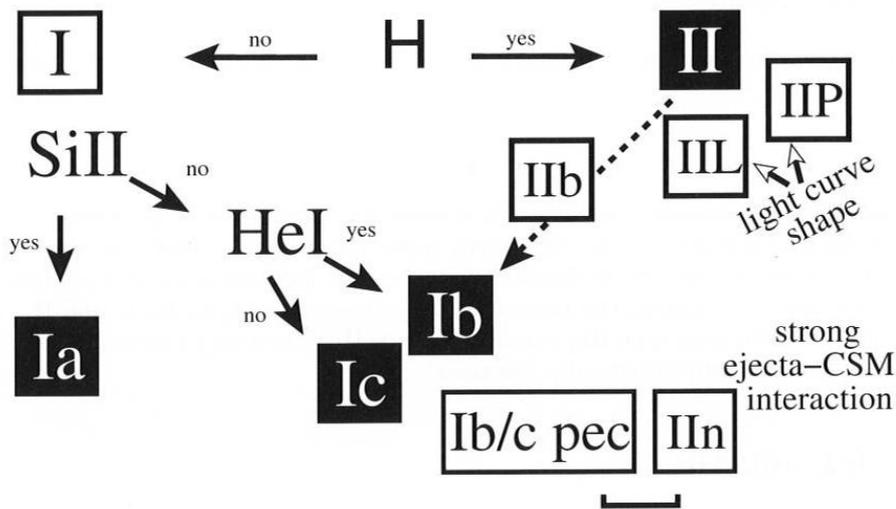


左: 典型的なIa型超新星の光度曲線 (Hamuy et al., 1996)

下: IIP型の光度曲線の模式図 (Utrobin, et al. 2007)

thermonuclear

core collapse



X線連星

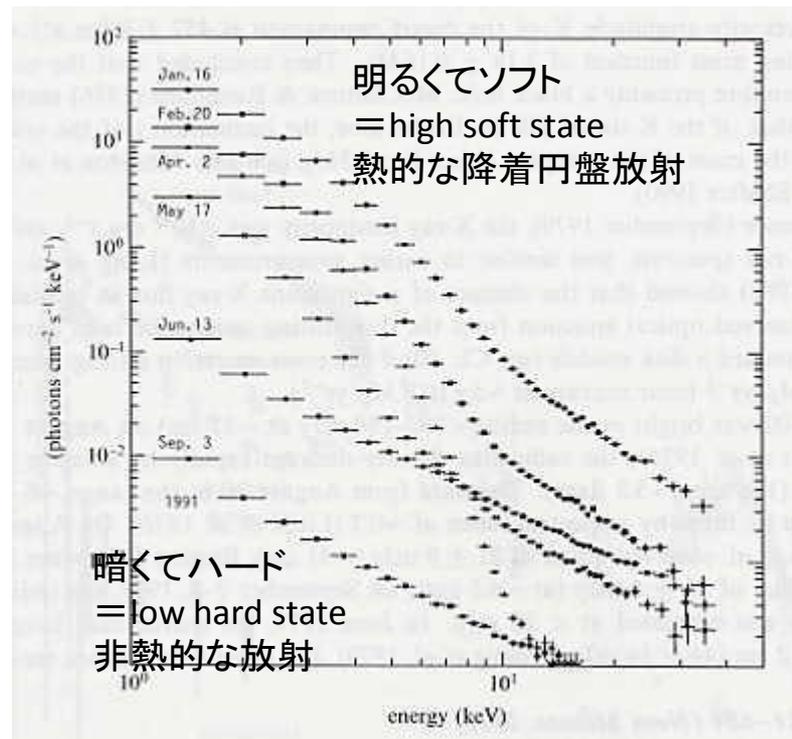
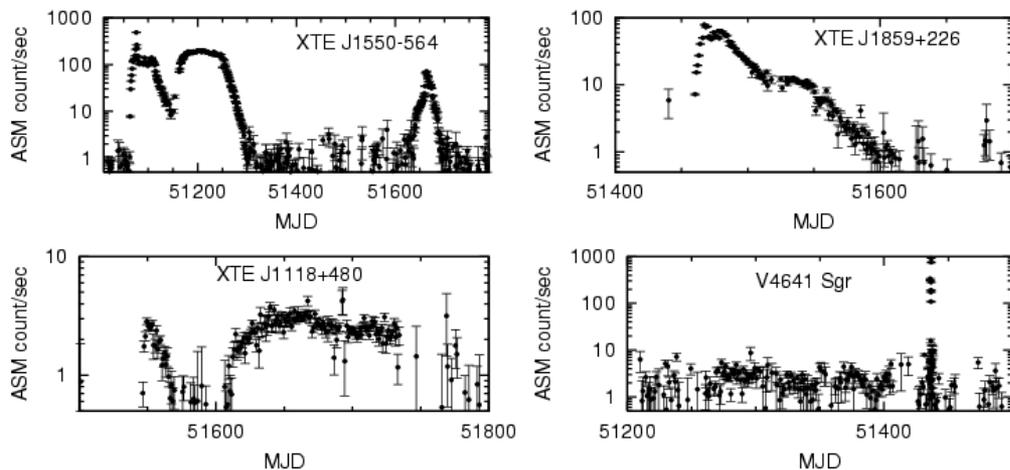
- ブラックホールor中性子星(主星) + 普通の星(伴星)
- 伴星での分類
 - High mass X-ray binary (HMXB): 伴星がOB型星。wind accretion。
 - low mass X-ray binary (LMXB): 伴星がGKM型星。Roche-lobe overflow。
- Transient or persistent sources
 - Transient source は「X線新星」とも呼ばれる。
- 関連天体
 - マイクロクェーサー: ジェットがでてるX線連星
 - Ultra-luminous X-ray source (ULX)
 - Supersoft X-ray source (SSS) = 激変星
- 降着円盤とジェットの相互作用の研究において、天然の「実験場」

可視域での伴星と円盤の光度の比較

	Optical luminosity (erg/s)		
	HMXB	LMXB (quisc.)	LMXB (outb.)
伴星	10^{36-38}	10^{31-32}	
円盤	$\ll 10^{35}$?	$< 10^{31}$?	10^{34-37}

GS 1124-68のスペクトル変化 (Tanaka & Lewin 1995)

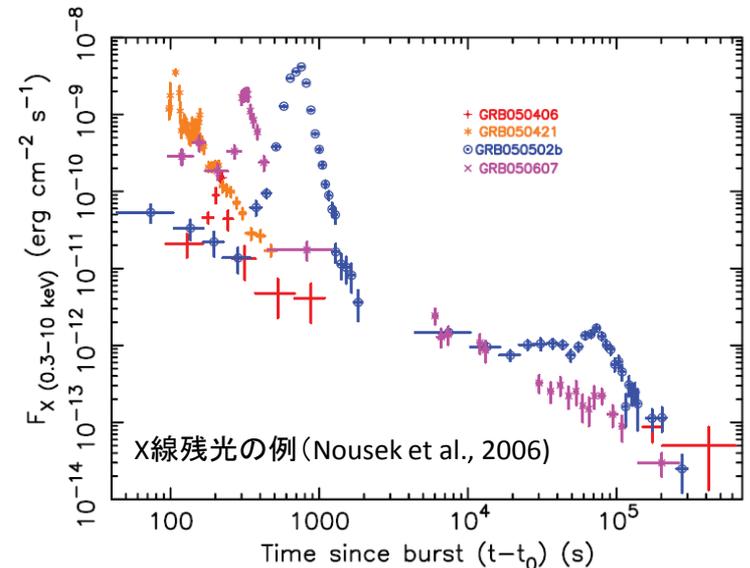
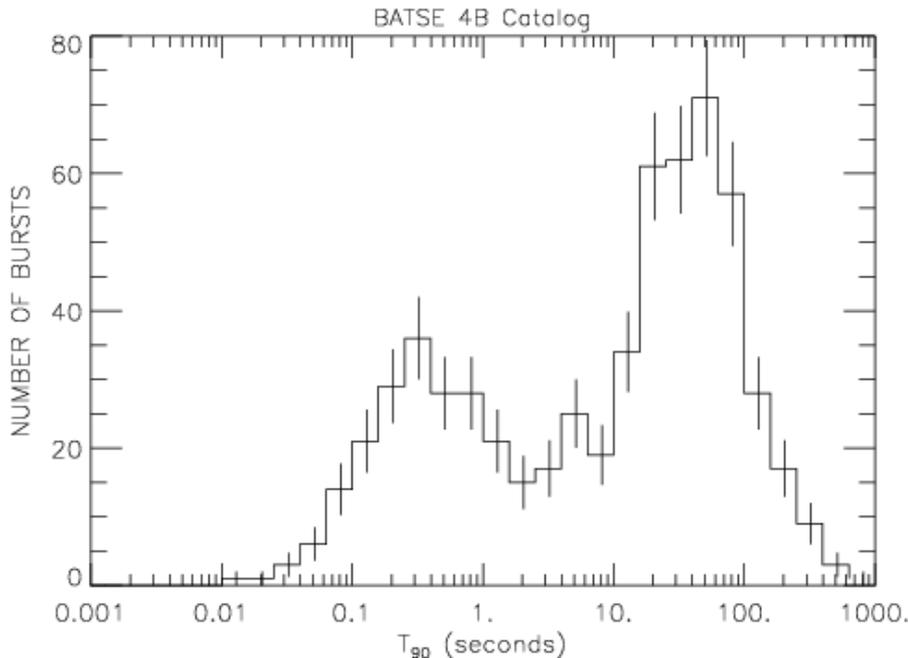
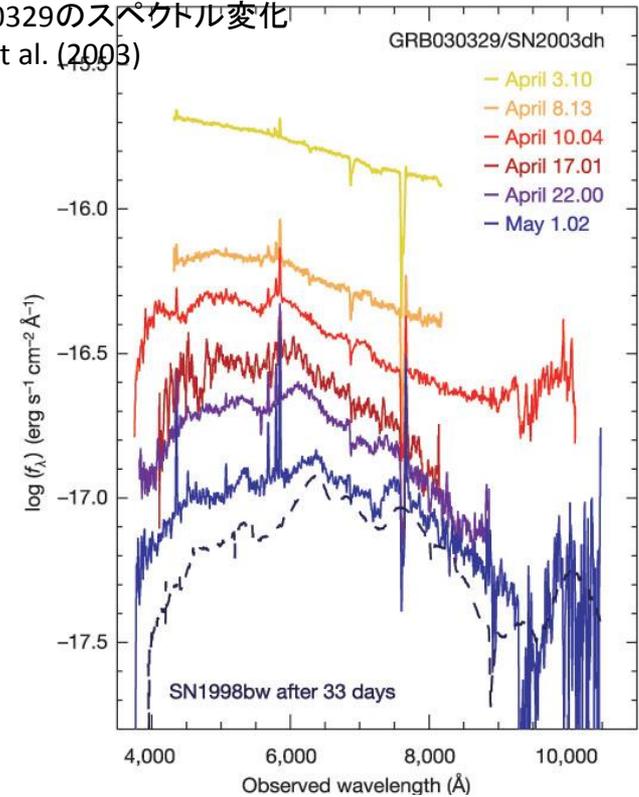
RXTE/ASMが観測したブラックホールX線新星の光度曲線



ガンマ線バースト (GRB)

- ガンマ線で明るくなる現象。継続時間は $10^{-2} \sim 10^2$ 秒。
- GRB後に、X線から電波まで比較的ゆっくり ($f \propto t^{-1 \sim -2}$) 減光する天体 = 残光。
- 継続時間が長いものと短いものに分かれる。
- 相対論的な速度 (bulk Lorentz factor = 10^{2-3}) のジェット。
- 長いGRBは重力崩壊型超新星に付随
 - 短いGRBは正体不明。中性子星同士の合体?
- 早期残光の挙動も原因不明。

GRB 030329のスペクトル変化
Hjorth et al. (2003)

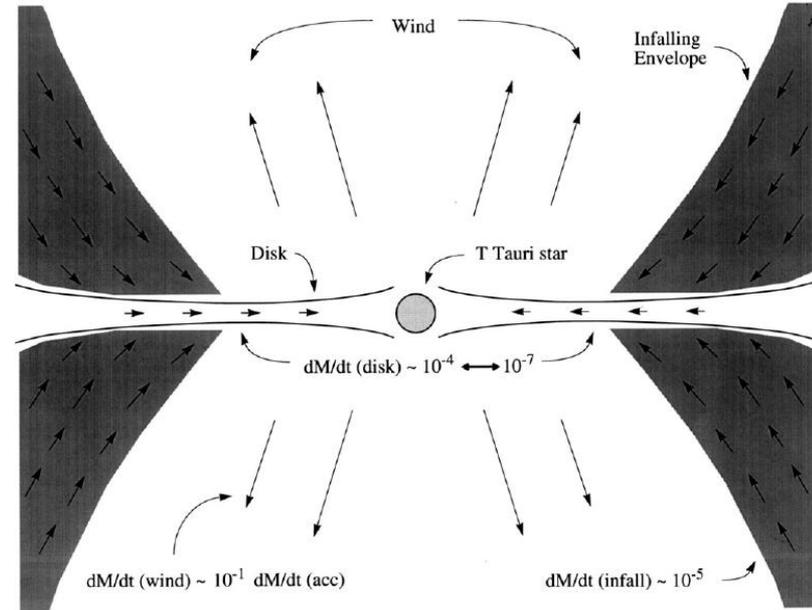
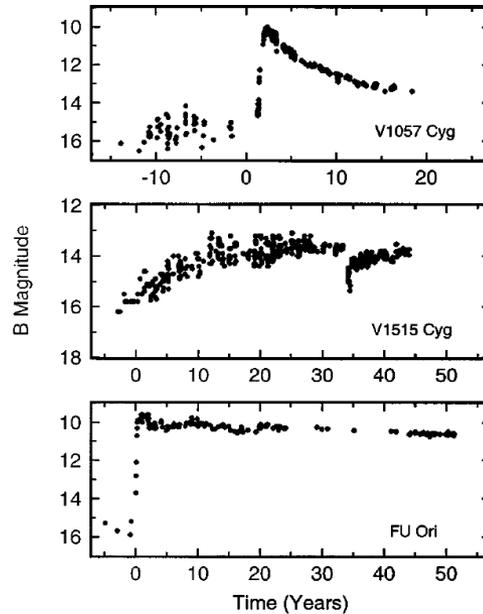


前主系列星 (pre-main sequence stars)

T Tau (INT)

- GCVSでは irregular variable に分類
- 不規則な変光: 振幅1-2等、タイムスケール数分-数時間。磁気コネクションか?
- (準)周期的な変動: タイムスケール1-10日、振幅<1等。自転、降着円盤、黒点などが原因?
- FU Ori型 (FU): 6等程度の大きな増光のあと、一定光度を保つか、徐々に減光。降着円盤内の降着率の増加と考えられている。
- EX Lup型 (EX): 5等程度の大きな増光のあと、比較的速く減光。

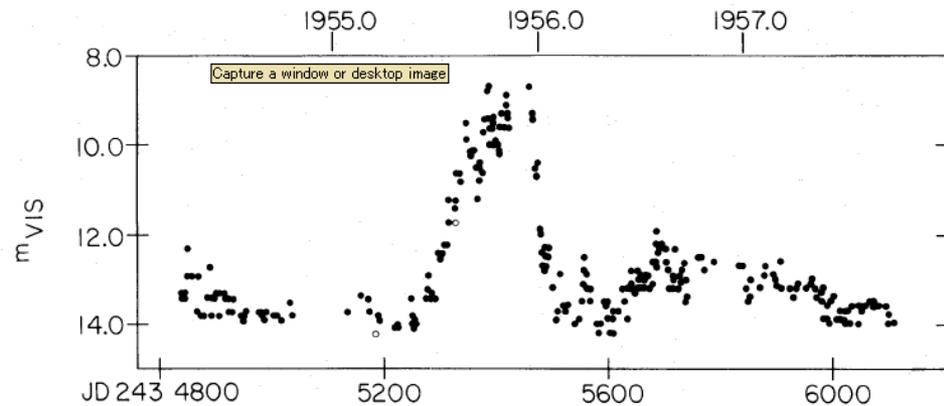
Hartmann & Kenyon (1996)



Herbig Ae/Be (INA)

- 輝線をもつAB型星で、前主系列星。
- T Tauが低質量星側(<3Mo)で、Herbig Ae/Be星が大質量側(4Mo<M<8Mo)になるが、星形成過程は低質量星と大質量星では異なると考えられているため、単純な類似ではない
- ダスト減光と思われる変動が観測される。変動タイムスケール:>数日、振幅:<1等

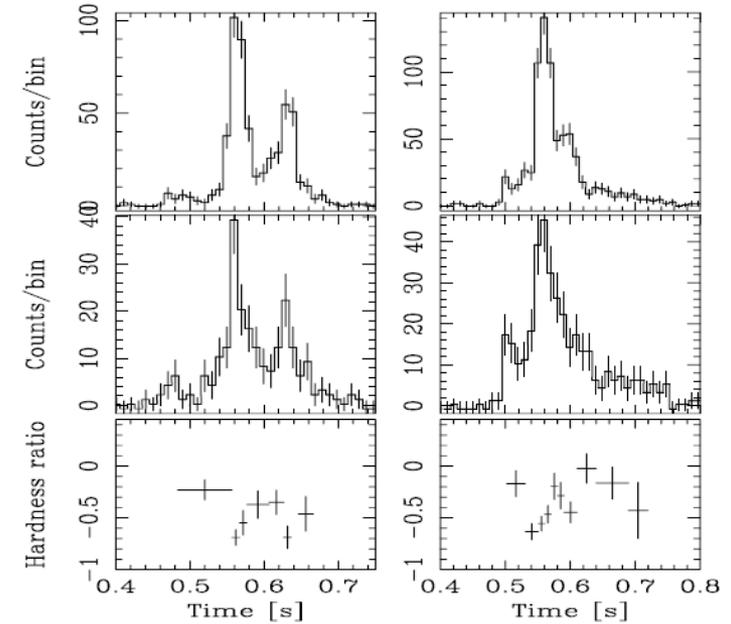
EX Lup の光度曲線 (Herbig 1977)



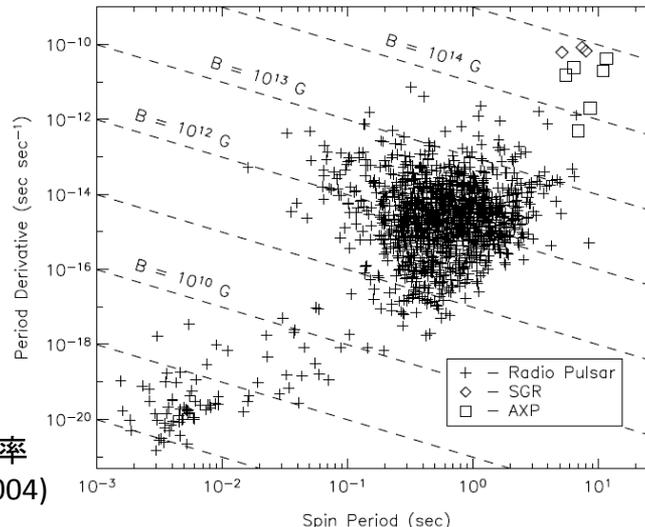
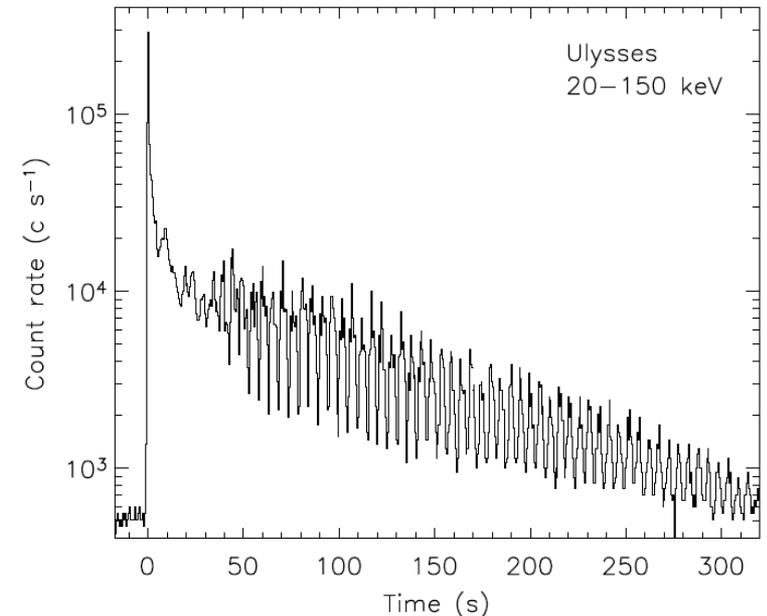
軟ガンマ線リピーター

- 軟γ線リピーター (soft gamma-ray repeater; SGR)
 - 発見当初はGRBの1種と考えられたが、バーストが繰り返すこと、パルスが検出されたこと、などからパルサーの1種であることが判明。
 - パルス周期5-12秒、大きい周期減少率(10^3 -5 yr)。連星系ではない。
 - 短いバースト: 0.1秒、不規則、 $\sim 10^{41}$ erg/s
 - Giant flare: 1秒ほどの鋭いspikeのあと、パルスが受かる。 $\sim 10^{44-47}$ erg/s。これまでに3イベントが知られている。規模が中間のバーストもあり、機構が同じ可能性も。
- Anonymous X-ray pulsar (AXP)
 - X線光度が異常に高いパルサーとして発見。
 - パルス周期と周期減少率がSGRと類似、いくつかのAXPではSGR-likeなバーストも観測 → SGRと同種天体
- Magnetar モデル
 - SGR, AXPはともに $B=10^{14-15}$ Gの磁場をもつ中性子星(=Magnetar)
 - 中性子星磁場の限界: 電子のランダウレベルのエネルギー差=静止質量 ($mc^2 = \hbar\omega \equiv \hbar eB/mc, B = \frac{m^2 c^3}{\hbar e} \sim 10^{13}$ G)
 - 放射エネルギーは主には磁場からきていると考えられている。
 - 固体表面の間欠的な破砕、リコネクション、など

SGR のburst光度曲線 (Gotz et al. 2004)



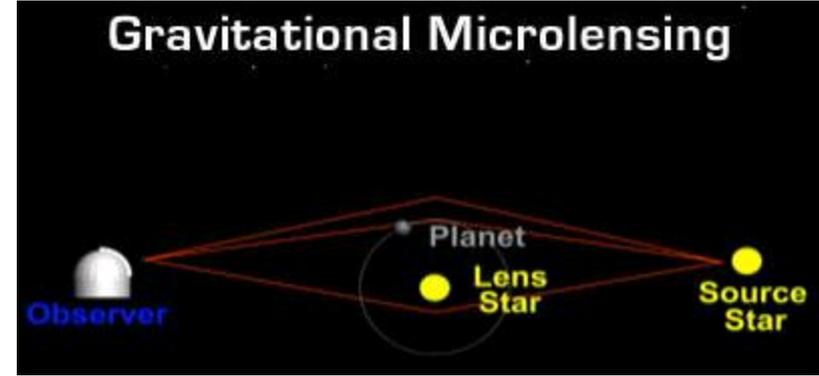
SGR 1900+14 の giant flare (Hurley et al. 1999)



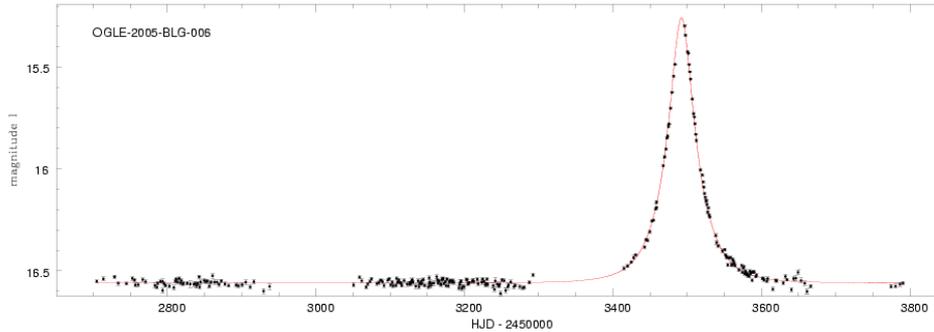
パルサーの周期-周期変化率 (from Woods & Thompson 2004)

マイクロレンズ天体

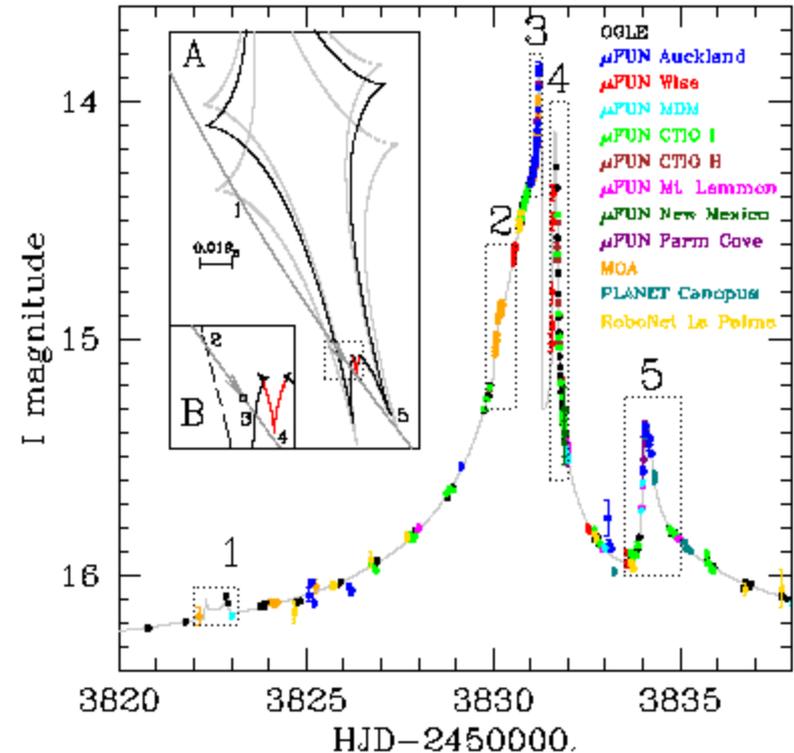
マイクロレンズ現象の概念図 (NASA)



マイクロレンズ天体 OGLE-2005-BLG-006 (OGLE)



OGLE-2006-BLG-109Lbc (Gaudi et al. 2008)



重カレンズ

- 一般相対論が預言する、重力による空間のゆがみが原因で起こる現象。手前にある重力源がレンズ天体となって、背景の天体からの光をまげ、像を多重にしたり、歪ませたりする。

マイクロレンズ現象

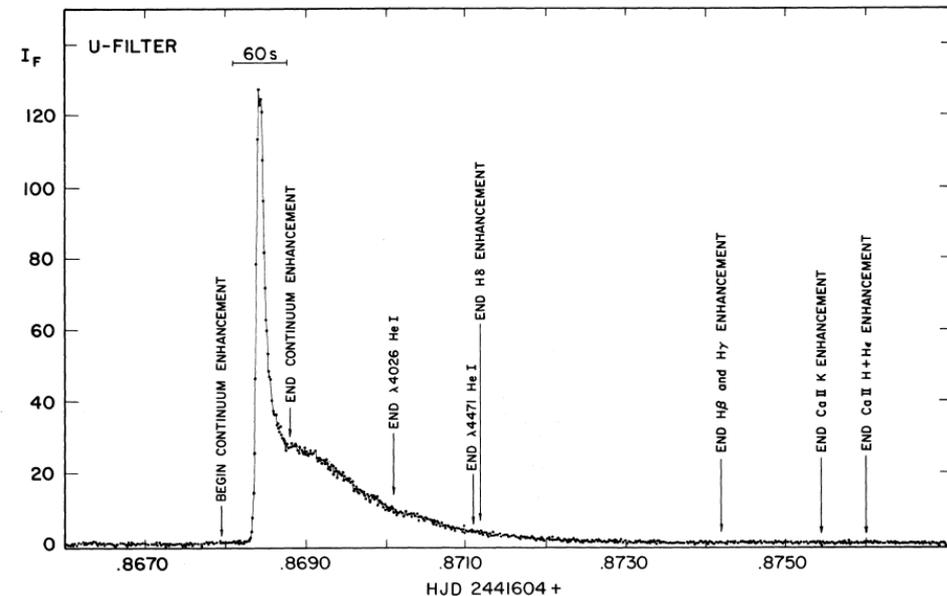
- 銀河系内の低質量星や褐色矮星、惑星などがレンズ天体となって、背景の天体の前を横切るときに明るく輝く
- 光度曲線からレンズ天体の物理パラメータや惑星の存在などを推定できる
- 色やスペクトルの特徴は変化しない
- マイクロレンズ現象のサーベイ計画
 - OGLE
 - MOA
 - MACHO

フレア星 (flare stars)

- 恒星フレア
 - 恒星やその周囲の降着円盤での磁場活動、特に磁気リコネクションによるエネルギー解放でフレアが起こると考えられている
 - 太陽フレアと同じ機構だとされるが、解放エネルギーは100万倍以上大きい
 - 非熱的・熱的なX線、可視域でも青い側の光で特に顕著なフレア
- UV Cet型 (UV)
 - K-M型星。輝線星。
 - 振幅:<6等、変光タイムスケール:数秒-数時間
- RS CVn型 (RS)
 - FGK型星を主星にもつ近接連星系。輝線星。
 - 特に Ca II H+K 線が特徴的で、彩層の活動性が高いことを示唆
 - 回転変光星としてもよく知られている
- 前主系列星も磁場活動に起因したフレアをおこすと考えられている

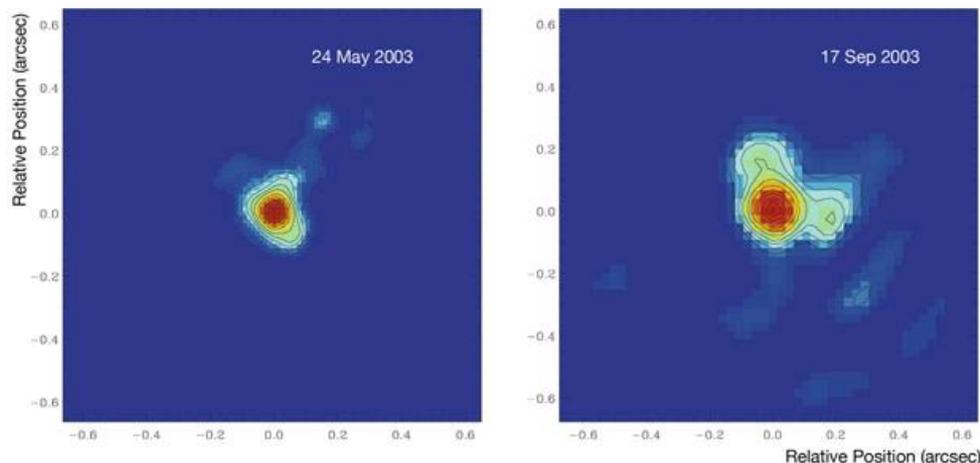
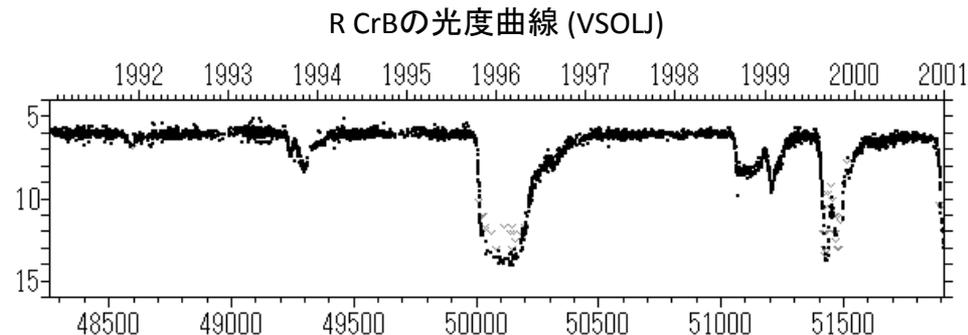


UV Cet の光度曲線 (Bopp & Moffett 1973)



R CrB型 (RCB)

- 光度曲線の特徴
 - 数年に1回、突発的な減光を起こす。振幅は3–5等。
 - 多くの場合で、減光よりも復光のほうが遅い
- スペクトルの特徴
 - 多くはFGK型超巨星 (yellow supergiant)
 - 水素の吸収線は弱く、炭素の線が強い
 - HR図上で Instability strip に位置し、数十日周期の脈動が観測される天体もある
 - まれにAB型も存在する。
- 変光の原因
 - 大気中の炭素が元でダストを形成し、可視光を吸収すると考えられている
 - ダストの生成・消失が星近傍か、>数十R*離れた位置か、まだよくわかっていない
 - 間欠的に物質が放出される？

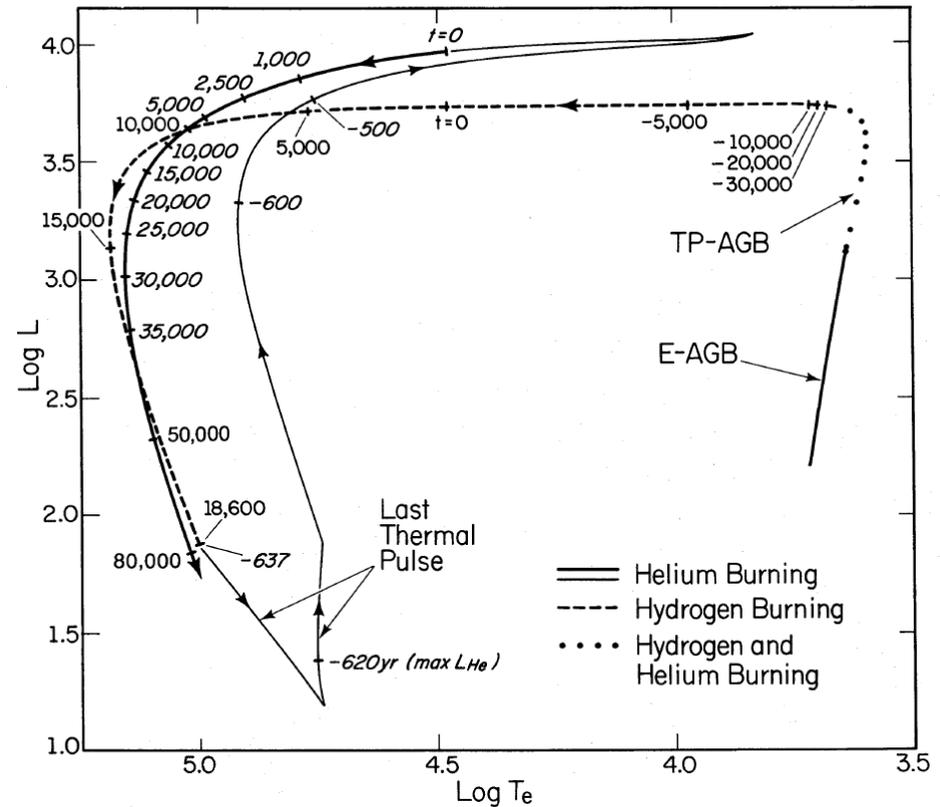


Clouds around RY Sagittarii (NACO/VLT)

Secular variables

- V605 Aql, FG Sge, V4334 Sgrの3天体のみで形成されるグループ
 - サンプルが少なく、そもそもよくわかっていない。
- 5等程度の増光のあと、超巨星のスペクトル(水素欠乏)を示す
- Final helium flash (final thermal pulse)
 - Post-AGB→白色矮星の進化経路にいる星がヘリウムシェルで最後の燃焼を起こし、一時的に超巨星に戻る。
 - Helium flash: 8Mo以下の星で、He shellの熱的不安定性によって間欠的に発生するHeの燃焼。s-processに重要。
 - そもそもは中心部分で水素が欠乏した惑星状星雲やRCB型星の水素欠乏スペクトルを説明するために提唱された説 (Iben, et al., 1983)
 - “Born-again post-AGB star”とも。
 - 恒星の通常の進化の過程上で発生する現象だと考えられている。
 - 観測例が少ないのは、恒星の進化タイムスケールに対して非常に短いから。
例: AGB phase = 10^5 yr,
secular variable phase = 10^{1-2} yr.
- 周囲に(惑星状)星雲が確認される。

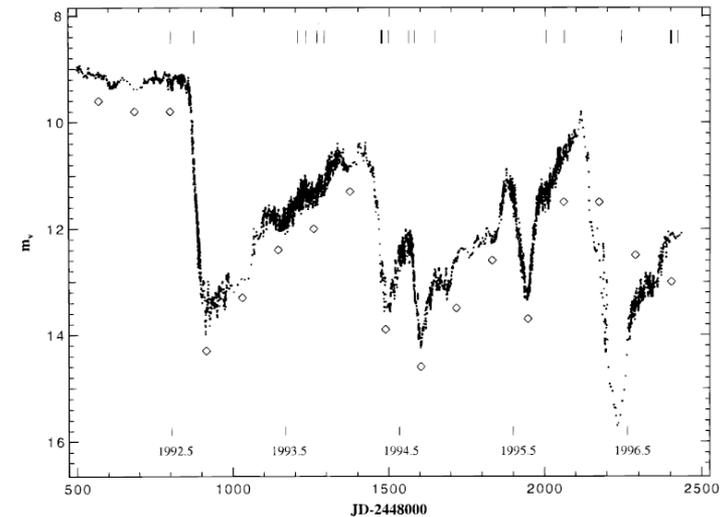
Final helium flash発生時のHR図上の移動 (Iben et al., 1983)



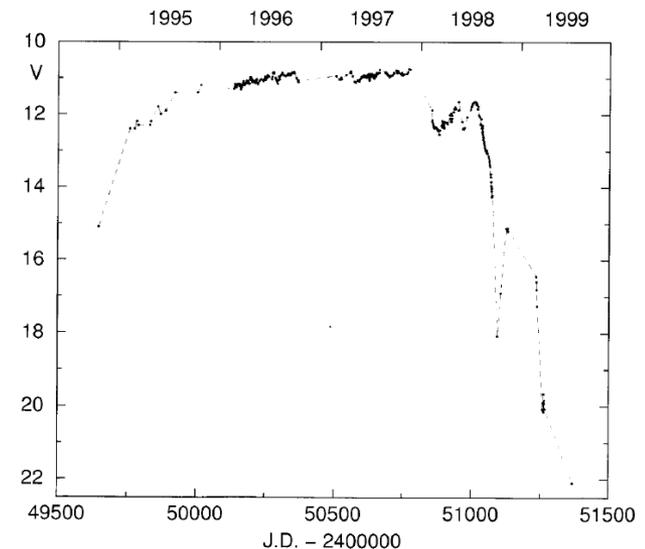
FG Sge, V4334 Sgr, V605 Aql

- FG Sge
 - 1894年 $m_{pg}=13.6$ から1965年 $B=9.6$ への増光。
 - 初出は Herbig & Boyarchuk (1968)
 - スペクトル: 1955年B5Ia → 1967年A5Ia → mid-1970 G2Ia → after 70' Fla (増光ストップ)
 - 増光のタイムスケールが他の2天体より長い。
 - 1992年から断続的な大規模減光=RCB型
- V4334 Sgr (櫻井天体)
 - Final helium flashがリアルタイムで観測された唯一の天体
 - 他の2天体は後年に解釈された
 - 最初は新星として、日本のアマチュア櫻井氏が1996年に発見
 - 1994年には既に15等台だった(?)。1995年初めに確実な増光(12.4)の記録あり。1997年には増光が止まる。1998年にダスト減光。
 - 増光前の天体=21等台の青い星が同定。おそらく白色矮星へと冷えていく過程の状態。
 - 増光後、スペクトルはF2Iaへ(Duerbeck & Benetti 1996)。
- V605 Aql
 - 1917年15等台で発見。1918-19年に $m_{pg}=10.2$ で極大。1923年にダスト形成、減光。
 - スペクトルは水素欠乏炭素星に似ていた。5000K。(Lundmark 1921)
 - 2001年で有効温度 95000K (Clayton, et al. 2006)
- Planetary nebulae, Abell 30, Abell 78, N66
 - 中心部に水素が欠乏しており、Final helium flashで超巨星に戻った後、再び白色矮星への冷却過程にある惑星状星雲と考えられている (Iben, et al. 1983)。
- 増光タイムスケールの違い
 - V4334 SgrとV605 Aqlは増光のタイムスケールが1年程度だが、FG Sgeは10年程度以上だった。
 - FG Sgeは2回目の born-again post-AGB? (Lawlor & McDonald 2003)

FG Sgeの RCB型減光 (Gonzalez, et al., 1998)

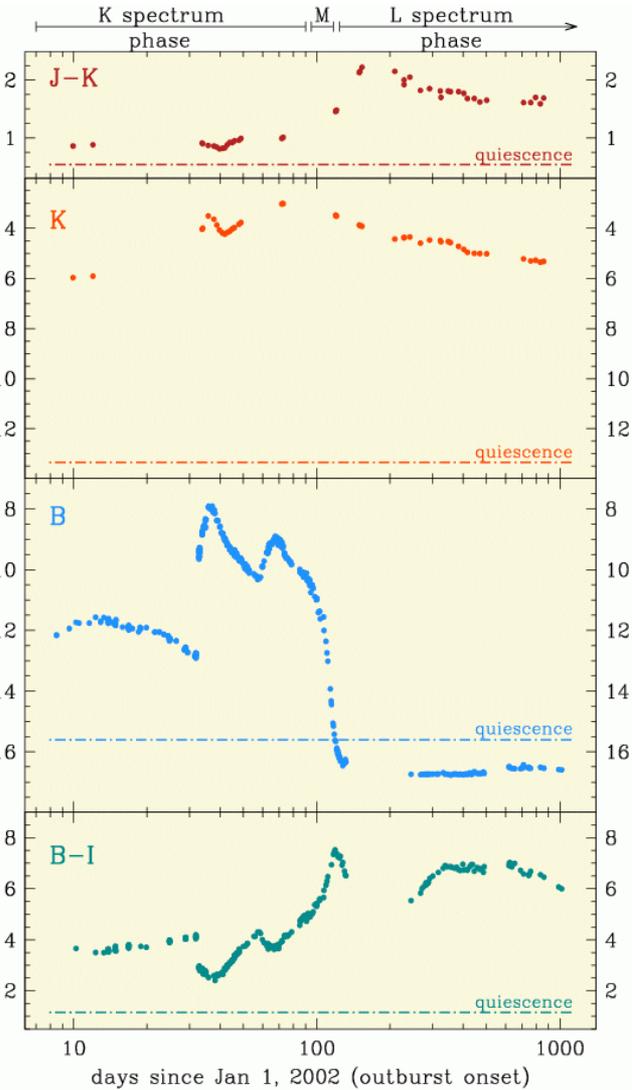


V4334 Sgrの光度曲線 (Duerbeck 2002)



V838 Mon

Munari & Heiden (2005)

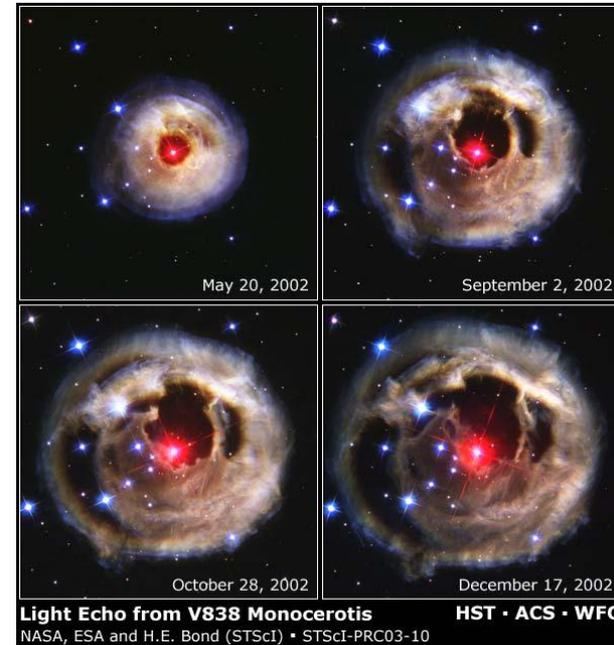


特異変光星

- 2002年1月に増光が発見。増光前は15等台。3回の極大の後、可視光では増光前よりもさらに暗い状態に。代わりに近赤外線では明るい状態が続いている。
- 発見当初は膨張ガス(500km/s)の、水素が欠乏したKIII型スペクトル。BaやLi(両方ともs-processでできる)が多い。その後、温度が低下しM型を経てL型超巨星に。このスペクトルを示した天体は史上初。
- 高い光度: 10^{38} erg/s (bolometric)
- Light echo が検出。
- B3V型の星との連星系 → 年齢が若い ≠ post-AGB

Secular variablesの類似天体、なのか、そうでないのか、まだ不明

- 巨大惑星を星が飲み込む説
 - Retter & Marom (2003)
- 星同士の合体説
 - Soker & Tylanda (2003)
- 古典新星の一種説
 - Bond, et al. (2003)
- 大質量星表面でのhelium flash説
 - Munari et al. (2005)
- 類似天体: M31-RV (1988), V4332 Sgr (1994)
 - 低温のスペクトル、高い光度が類似。

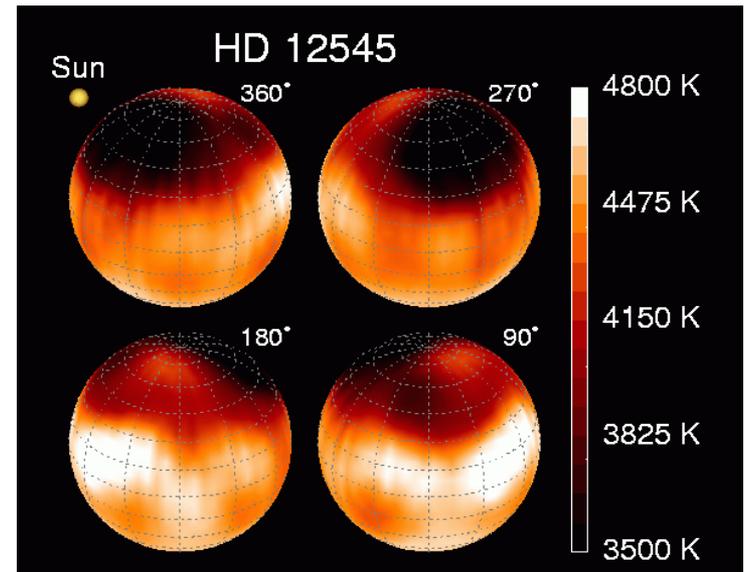
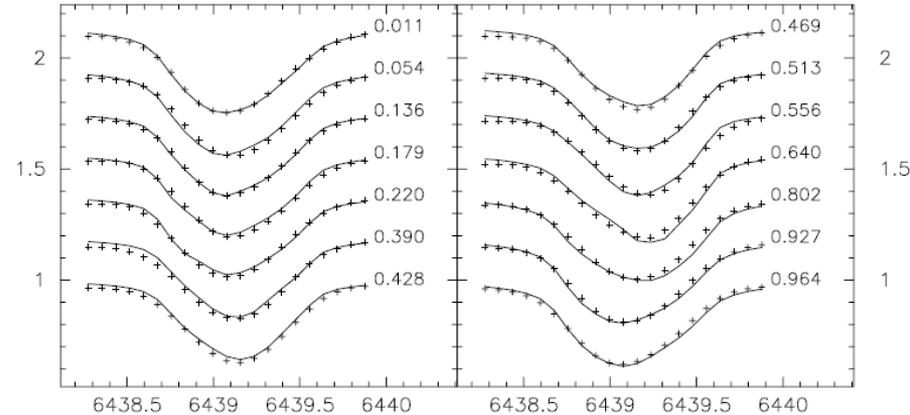


Light Echo from V838 Monocerotis HST · ACS · WFC
NASA, ESA and H. E. Bond (STScI) · STScI-PRC03-10

回転変光星

- RS CVn (RS) & BY Dra (BY)
 - 自転に伴う巨大黒点の見え方で変光する
 - 振幅<0.5等、変光タイムスケール: 数時間~数10日
 - RS CVnについては爆発変光星の項も参照
 - Doppler imaging: 吸収線プロファイルの自転に伴う時間変動から、tomographyで星表面の輝度分布を再構成する
→ 巨大黒点の時間変化
- 回転楕円変光星 (ELL)
 - 連星系で、ロッシュローブをほぼ満たしている天体の連星公転に伴う変光

HD 12545 (RS) の Ca I 6439 吸収線と Doppler image (Strassmeier 1999)



まとめ

- 1時間でたくさんの変光星について喋られても覚えられんわ！ という方は、普段使っている講義用テキストを後でゆっくり参考にしてください。

http://home.hiroshima-u.ac.jp/uemuram/lecture/lecture_variables.pdf