

# Étoiles variables cataclysmiques



Pierre de Ponthière

AAVSO member (DPP)

CBA Lesve

[www.dppobservatory.net](http://www.dppobservatory.net)

2009/10/16

# Structure de l'exposé

- Caractéristiques des CV (Cataclysmic Variables)
- Construction d'un modèle d'**astrophysique**  
à partir de mesures simples de la "courbe de lumière"
- Application de la loi de Kepler
  - distance entre les étoiles
- Analyse d'une courbe de lumière
  - surfaces, luminosités, températures, diamètres relatifs
- Caractéristiques physiques des étoiles
  - masse, densité
- Transfert de matière : pourquoi et combien
- Évolution des CV

# Caractéristiques communes des cataclysmiques

- Étoiles variables à courtes périodes
  - de 1 à 10 heures
- Étoiles doubles très rapprochées
  - doubles + courte période + lois Kepler = étoiles proches
  - la Terre met plus de 365 jours pour une rotation autour du Soleil!!
- Transfert de matière de l'une vers l'autre
  - disque d'accrétion (comme Saturne et le système solaire)
- Causes de la variabilité
  - éclipses (pas toujours, il faut être dans le plan de l'orbite)
  - transfert de matière
  - instabilité du disque d'accrétion
  - etc..

# Construction d'un modèle

- Courbe de lumière

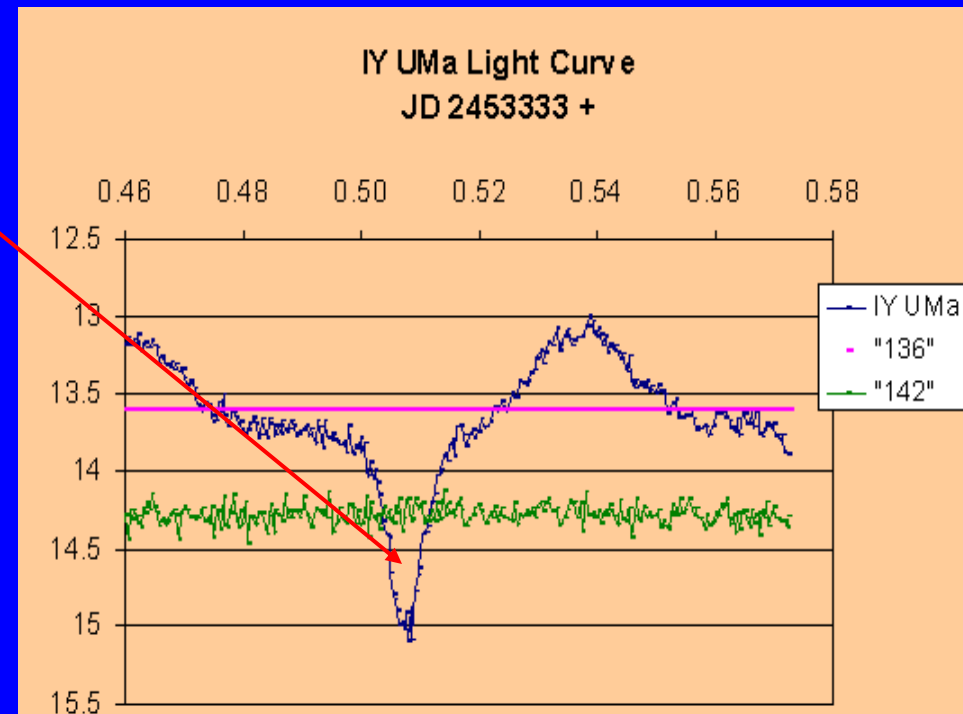
- si cette courbe venait d'un système d'étoiles doubles? = notre **HYPOTHÈSE**

- Éclipse (pour certaines, bonne configuration)

JD 2453333 = 23/11/2004

- période (temps entre deux éclipses = temps de révolution)
- durée
- niveaux de luminosité
- temps de descente et de montée

- Construisons le modèle

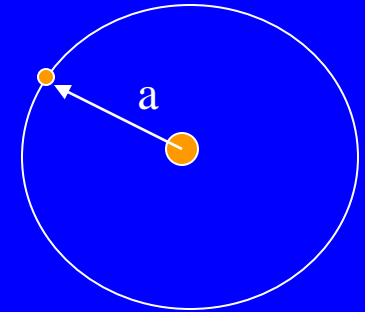


# Période des éclipses

## Loi de Kepler

- Période de révolution liée à

- la distance des deux corps =  $a$  (demi grand axe)
- de leur masses  $M$  et  $m$



- $P^2 = 4 \pi^2 a^3 / G(M+m)$

- Plus les corps sont éloignés, plus la période est longue
- Exemples  $(P_1/P_2)^2 = (a_1/a_2)^3$  si  $M+m_1 = M+m_2$ 
  - la Terre  $\rightarrow$  1 an = 365.25 jours = 8 766 heures,  $a = 1$  AU
  - Mars  $\rightarrow$  687 jours  $(687/365)^2 = (a/1\text{AU})^3 \rightarrow a = 1.52$  AU
  - Mercure  $\rightarrow$  88 jours  $\rightarrow a = 0.387$  AU
- Les cataclysmiques 1 à 10 heures de révolution
- 1000 fois plus vite que la Terre!!!
- quelle sera la distance entre ces étoiles?  $P = (2h) \rightarrow a$  petit

# Loi de Kepler

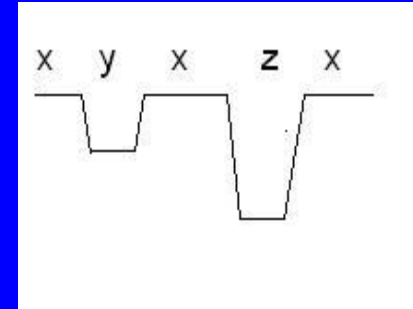
- Période de révolution liée à
  - de leur masse M et m (en kg)
  - la distance des deux corps = a (en mètres)
  - temps en secondes (Système KMS Kg, m, sec)
- $P^2 = 4 \pi^2 a^3 / G(M+m)$ 
  - M+m = 1 masse solaire
  - masse solaire =  $2. \cdot 10^{30}$  kg ( 2 et 30 zéros derrière )
  - $G = 6.7 \cdot 10^{-11} = 0,000\ 000\ 000\ 067$  (le 6 à la onzième position derrière la virgule)
  - P = 2 heures = 7 200 secondes
- $a^3 = G(M+m) P^2 / 4 \pi^2$ 
  - $a^3 = 6.7 \cdot 10^{-11} \times 2. \cdot 10^{30} \times 7200^2 / ( 4 \times \pi^2 ) = 1.7 \cdot 10^{26}$
  - $a = 5.5 \cdot 10^8$  m = 550 000 km
  - rayon du soleil =  $7 \cdot 10^8$  m = 700 000 km
- Les deux étoiles occupent un espace inférieur au Soleil!!  
Normal que mon télescope ne les distinguent pas...





# 2 étoiles très rapprochées

- Si elles sont si proches
  - elles ont des diamètres plus faibles que le Soleil
  - mais comment les mesurer
  - et quelle seront leur masses, volumes et densités?
  
  - étoile double → éclipse  
(si le plan de rotation est bien situé par rapport à nous)

# Analyse des éclipses

- $A_1$  et  $A_2$  surfaces des étoiles
- $B_1$  et  $B_2$  brillance par unité de surface
- $L_1$  et  $L_2$  luminosité des étoiles  $L = A B$



- $x = L_1 + L_2 = A_1 B_1 + A_2 B_2$  1  2 
- $y = A_1 B_1 + (A_2 - A_1) B_2 = A_1 B_1 + A_2 B_2 - A_1 B_2$  
- $z = L_2 = A_2 B_2$  étoile 1 est derrière 

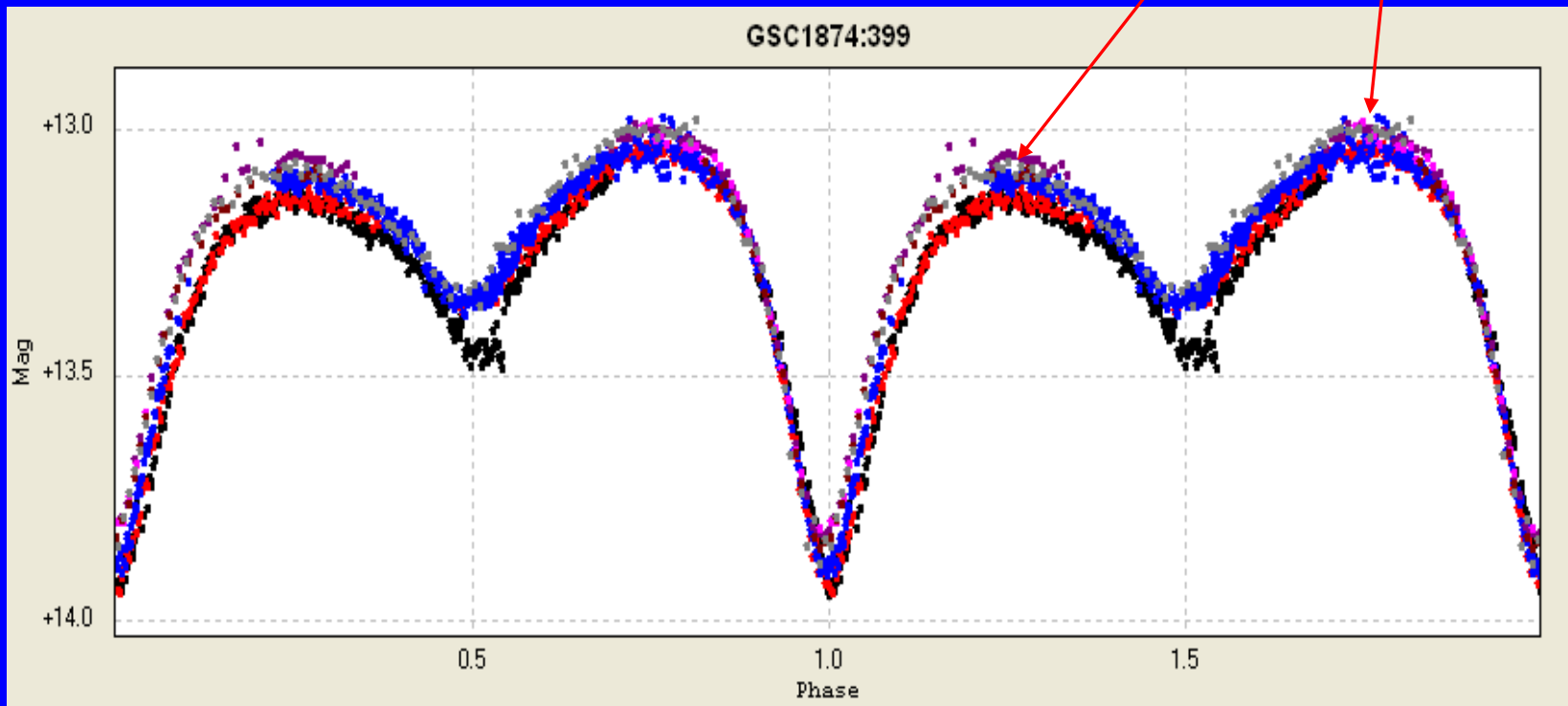
3 luminosités  
mesurées:  
x y z

- $x - z = A_1 B_1 = L_1$
- $x - y = A_1 B_2$
- $z / (x - y) = A_2 / A_1 \rightarrow$  rapport des surfaces
- $(x - y) / (x - z) = B_2 / B_1 = (T_2 / T_1)^4$  (loi de Stefan)
- $(x - z) / z = A_1 B_1 / A_2 B_2 = L_1 / L_2$   $L =$  luminosité  $\rightarrow$  magnitude



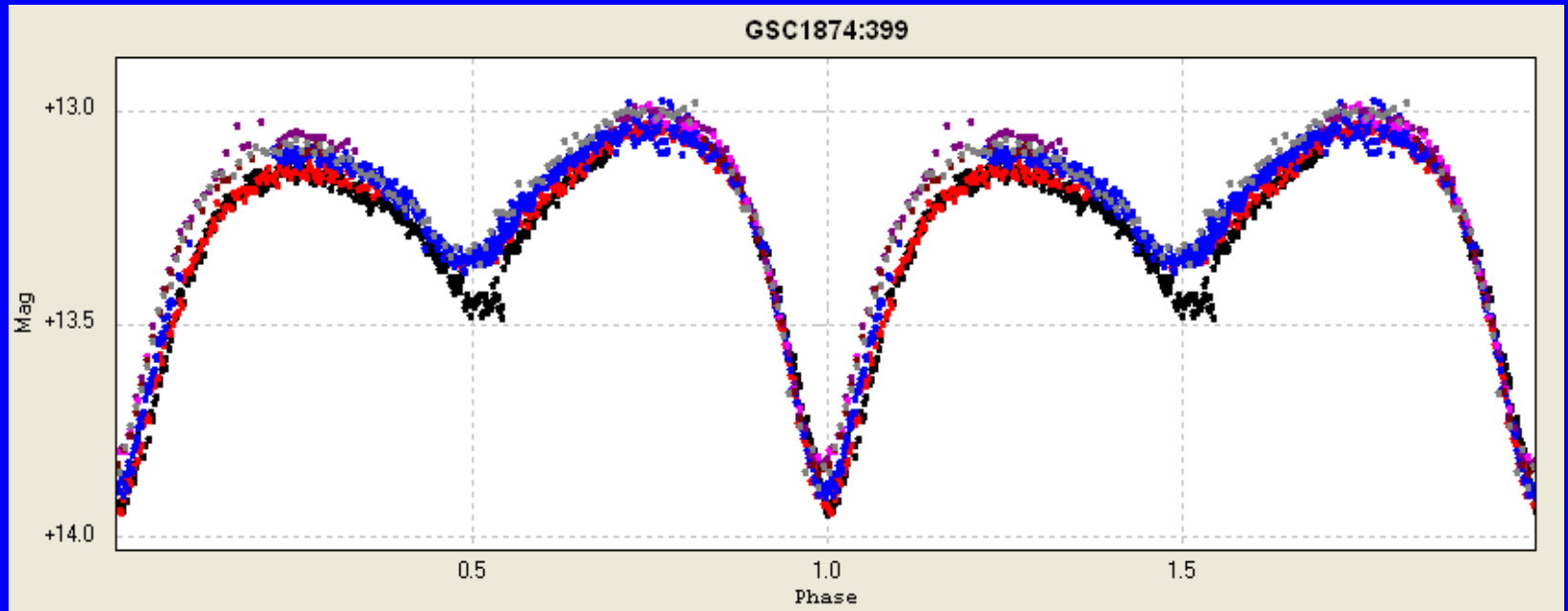
# Un exemple (Semi-détachées)

- Oui, mais ici on a deux valeurs différentes pour  $x$  ?
- Pourquoi?
- Aux deux maxima,  $x = L_1 + L_2 = A_1B_1 + A_2B_2$
- Mais deux valeurs différentes de  $x$



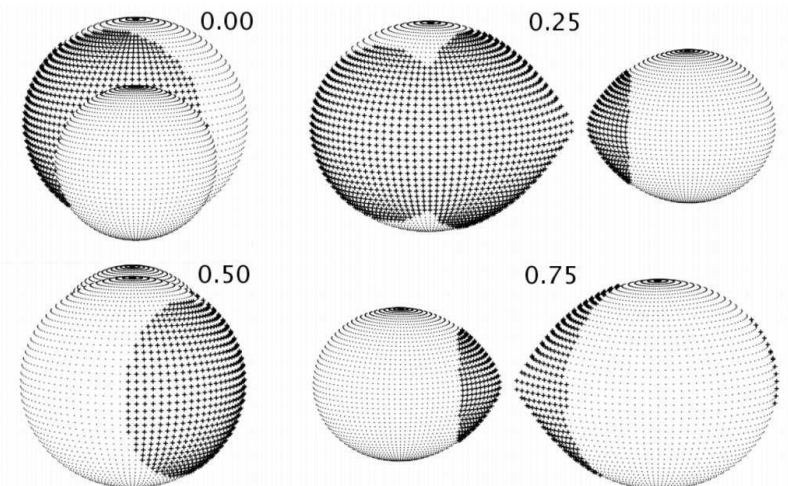
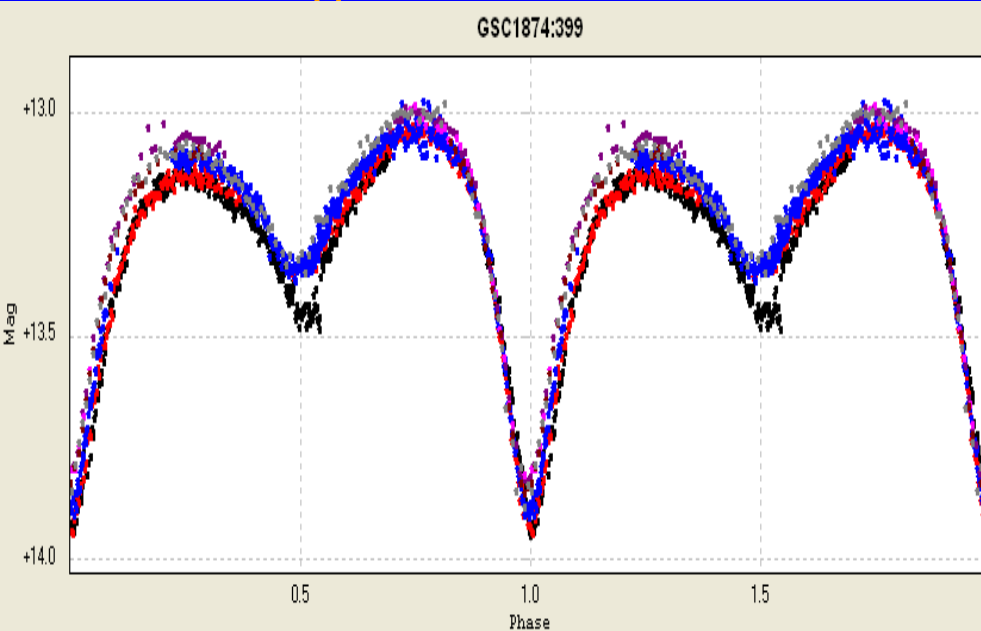
# Un exemple

- Aux deux maxima,  $x = L_1 + L_2 = A_1B_1 + A_2B_2$
- $A_1$  et  $A_2$  les surfaces sont inchangées
- $B_1$  et / ou  $B_2$  ont changé,
- → Les brillances ne sont pas constantes.



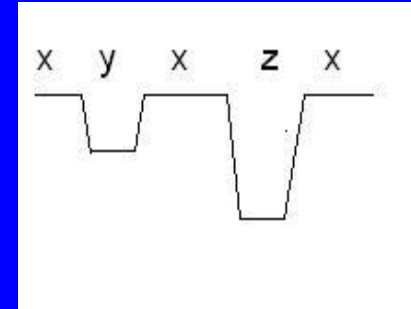
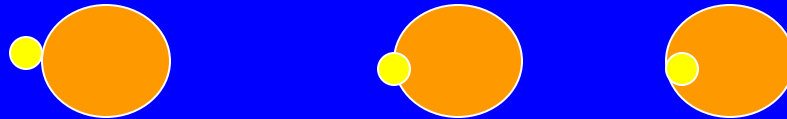
# Un exemple

- $B_1$  et / ou  $B_2$  ont changé, les brillances ne sont pas constantes.
  - Les étoiles ne nous présentent pas toujours la même face
  - Les brillances sont fonction de la température (loi de Stephan)
  - Les températures des faces visibles ne sont pas constantes
  - La différence entre les valeurs  $x$  pourrait provenir de taches "solaires" sur les deux étoiles.
- Hypothèse contestée. Effet O'Connell

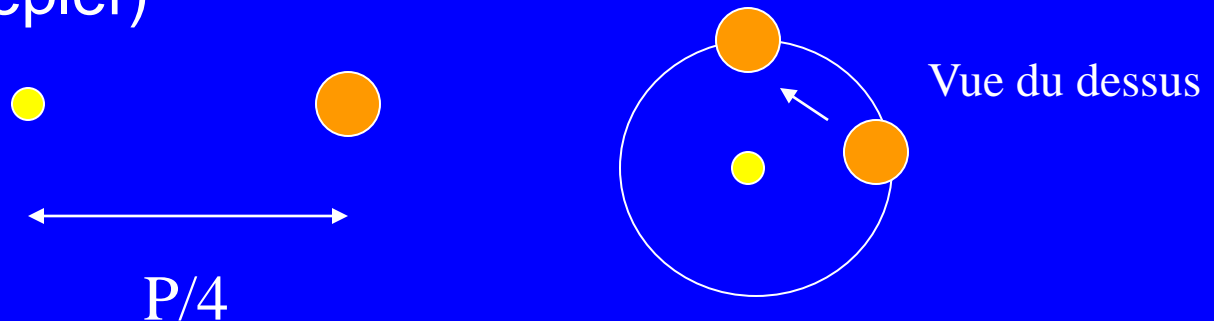


# Analyse des éclipses

- Temps entre les niveaux x et y



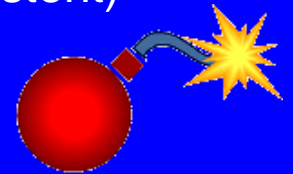
- et la période  $P$  permet de calculer la distance maximale entre les étoiles (voir notre exercice Kepler)



- et donc les rapports :diamètres des étoiles et de l'orbite

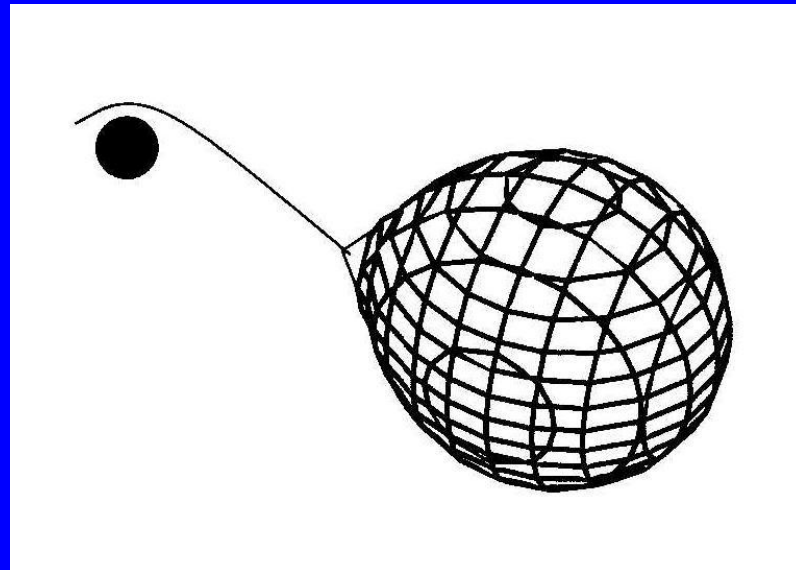
# CV = 2 naines : blanche et brune

- Diamètre de la naine blanche: la plus massive
  - proche de celle de la Terre 12 756 km
- La naine blanche doit avoir une masse inférieure à 1.4 fois la masse du Soleil (quelques exceptions existent)
  - Limite de Chandrasekhar  
si plus importante, la gravité → explose en Supernova Type Ia et il reste une étoile à neutron
  - valeurs typiques 0.5 à 0.6 masse solaire
  - on connaît la masse et le volume d'où la densité
  - **densité élevée**  $10^6 \text{ kg/dm}^3 = 1000 \text{ tonnes/dm}^3$   
eau  $1 \text{ kg/dm}^3$ , mercure  $13.6 \text{ kg/dm}^3$ , Soleil  $1.4 \text{ kg/dm}^3$ ,  
étoiles à neutrons  $10^{15} \text{ kg/dm}^3$
- Quid des lois de la physique dans cet environnement  
**L'astrophysique permet de vérifier les lois / modèles de la physique fondamentale (quantique et relativiste).**

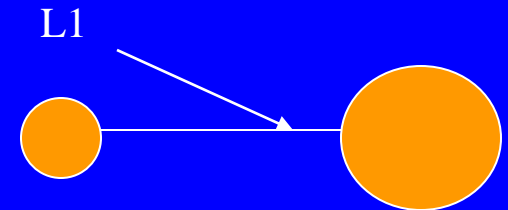


# La naine rouge

- La naine rouge est de faible densité et gazeuse
- La forme de la naine rouge, proche de la naine blanche, va être déformée par la gravité (effet de marée) en forme de poire.



# Le premier point de Lagrange



- Premier Point de Lagrange L1
  - point d'équilibre entre 2 corps
  - il existe un point entre la Terre et la Lune où les attractions des deux corps sont égales.
  - ce point d'équilibre est instable, c'ad si on se rapproche un peu de la Terre on retournera vers la Terre et inversement dans l'autre direction on partira vers la Lune.
- La surface déformée de la naine rouge peut atteindre ce point de Lagrange.
  - la matière de la naine rouge quitte celle-ci et part vers la naine blanche
  - début du cataclysme

# Transfert de matière

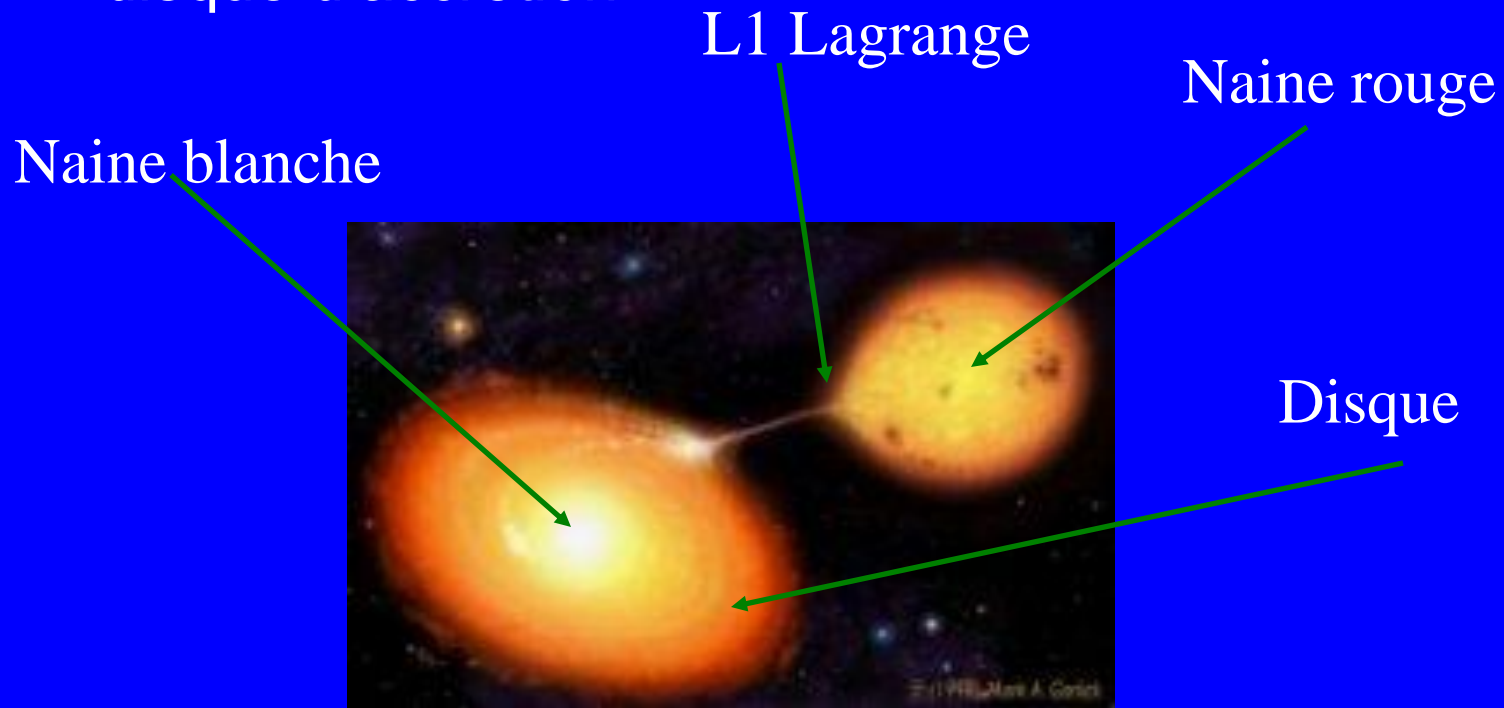
- La matière s'échappe de la naine rouge
- *fin filet* de matière: 10 milliards T/sec  
 $10^{13}$  kg/sec =  $3 \cdot 10^{20}$  kg/an
- est-ce beaucoup, pas tellement!!  
masse solaire  $2 \cdot 10^{30}$  kg,  
le Soleil nous réchauffe en consommant de l'hydrogène  
500 millions T/sec  $5 \cdot 10^{11}$  kg/sec → Attention aux coups de soleil
- Ce transfert ne représente qu'une perte d'un dix milliardième de masse solaire par an. Cela peut durer... Mais il y aura une fin.
- La masse de la naine blanche augmente mais doit rester en dessous de la masse critique de Chandrasekhar (1.4 masse solaire) → fin de la naine blanche possible.





# Disque d'accrétion

- La matière s'échappe de la naine rouge et forme un disque d'accrétion.

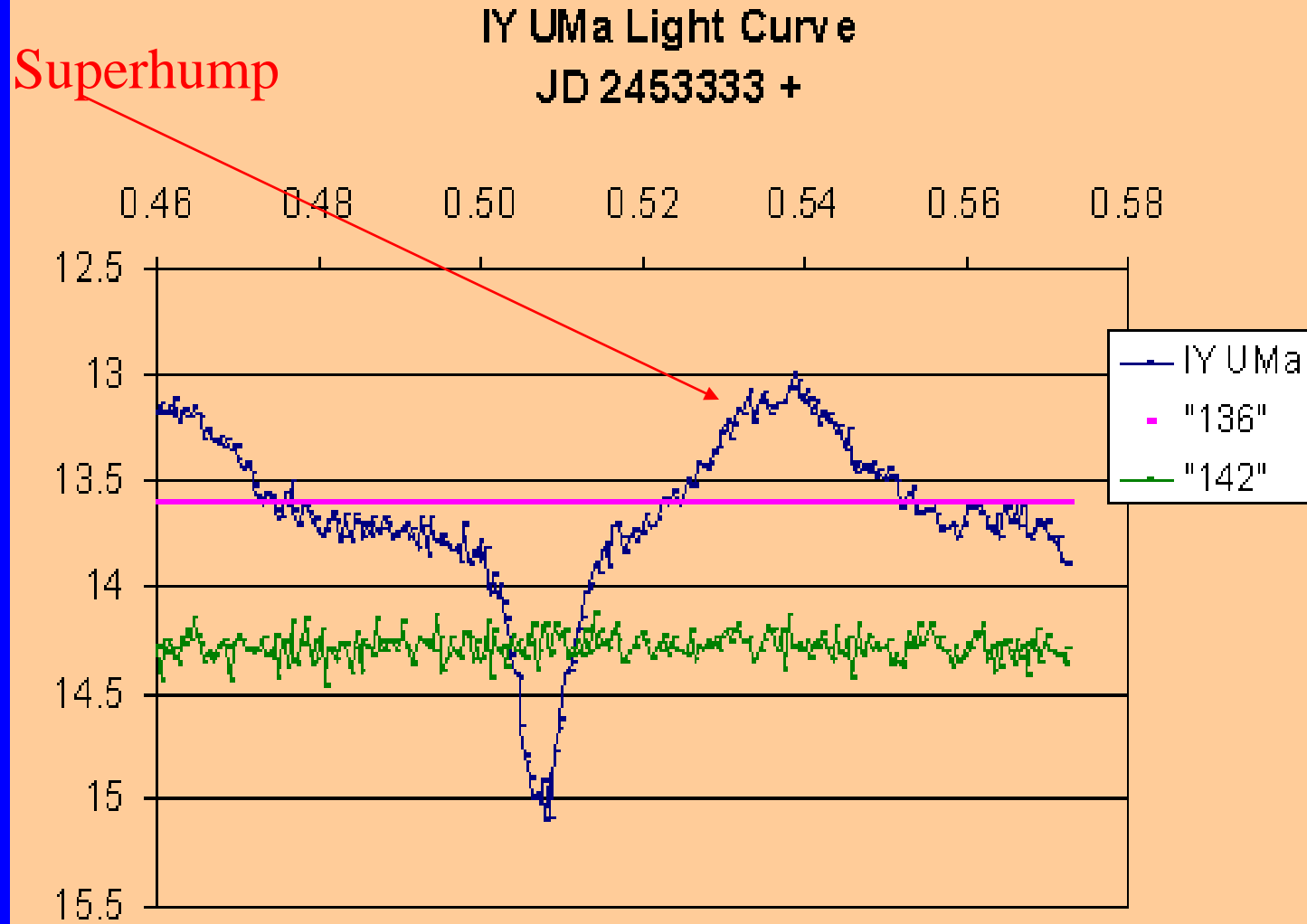


Vue d'artiste

# Instabilité du disque d'accrétion

- La matière s'échappe de la naine rouge
- Forme un disque
- La matière s'accumule dans le disque
- Accumulation entraîne une instabilité
- Instabilité → Outburst = augmentation de la luminosité durant plusieurs jours/semaines
- Durant ce phénomène, → superhumps = augmentation de la luminosité pendant une fraction de la période de révolution.
- La période des superhumps est légèrement différente de la période de base.

# Courbe de lumière



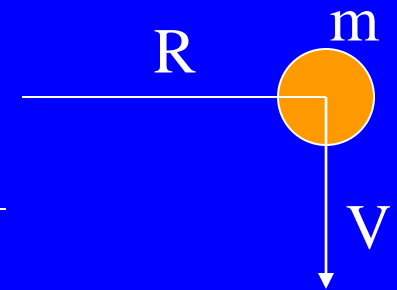
# Évolution de l'étoile

- La matière s'échappe de la naine rouge
- Augmentation de masse de la naine blanche
  - limite de Chandrasekhar → supernova à long terme
- Diminution de la masse de la naine rouge
  - Quelles conséquences??

# Moment angulaire



- Un danseur/patineur rapproche ses bras pour accélérer sa pirouette et les écarte pour la ralentir.
  - Le moment angulaire  $J$  reste constant (en l'absence de frottement).
  - $J = mRv$ ,  $J = \text{cst}$ , si  $R$  diminue,  $v$  augmente
- 



- La naine rouge perd de la masse
- Transfert  $\rightarrow m$  diminue et  $J$  doit rester constant
  - $\rightarrow R$  augmente mais moins que  $v$  diminue ( $P^2 a^3$ )
  - $\rightarrow$  Risque de ne plus atteindre L1
  - $\rightarrow$  Plus de transfert de matière
- Or on constate l'effet inverse??

# Freinage

- Si le moment angulaire reste constant.
  - les étoiles s'éloignent et le transfert de matière disparaît
- Il faut donc une diminution du moment angulaire par un freinage pour que le transfert de matière continue.
- Freinage par radiation gravitationnelle (relativité générale)
- Freinage magnétique
  - vent de particules ionisées (courant électrique) + champ magnétique = force de freinage (comme dans une dynamo)
- $J = mRv$ ,  
J = diminue (freinage), m diminue (transfert)  
R peut rester constant et même diminuer pour que le point de Lagrange reste sur le bord de la naine rouge. Le transfert de matière n'est pas interrompu (CQFD)

# Diversité des cataclysmiques

- Pourquoi toutes les cataclysmiques ne sont pas toutes du même type?
  - elles évoluent dans le temps et modifient de leur comportement
  - conditions initiales différentes
    - masses, champ magnétique, vitesse de rotation de la naine blanche, etc..
- Tous les mécanismes ne sont pas encore bien compris

# Conclusions

- L'observation des étoiles cataclysmiques et autres variables permet de mettre sur pied des modèles (astrophysique) décrivant ces étoiles.
- Les amateurs observateurs d'étoiles variables contribuent au développement de la science.
- Leurs efforts sont reconnus par la communauté scientifique.
- Mais ...





# Clause de non-responsabilité de mon exposé

- "I feel it my duty to warn any others who may show signs of star susceptibility that they approach the observing of variable stars with the utmost caution. It is easy to become an addict and, as usual, the longer the indulgence is continued the more difficult it becomes to make a clean break and go back to a normal life."
- Traduction libre : Il est de mon devoir de prévenir ceux qui montrent des signes d'intérêt dans l'observation des étoiles variables de le faire avec précaution. Il est facile de devenir dépendant et plus on s'y intéresse, plus est difficile d'arrêter et de revenir à une vie normale...

Citation de  
Leslie C. Peltier (1900 – 1980)  
astronome amateur

# Bibliographie

- **Understanding Variables Stars**  
de John R. Percy, Editeur : Cambridge University Press
- **Cataclysmic Variable Stars – How and why they vary**  
de Coel Hellier, Editeur : Springer
- **Cataclysmic Variable Stars**  
de Brian Warner, Editeur : Cambridge University Press

**THE END**