

Naines blanches, pulsars et autres objets compacts

6. Systèmes binaires avec une étoile compacte

Fabrice Mottez

LUTH, Observatoire de Paris, CNRS, et Univ. Paris Diderot

Festival d'Astronomie de Haute Maurienne, août 2007.

étoiles doubles

La moitié des étoiles sont dans un système multiple, double bien souvent.

Ces étoiles ont été créées en même temps, elles ont le même âge, mais pas nécessairement la même masse.

Certaines binaires sont proches, d'autres très éloignées.

La relation entre la distance a des étoiles et la période T est

$$a^3 = T^2 G (M_1 + M_2)$$

(troisième loi de Kepler).

Les périodes de rotation d'une étoile autour de sa voisine varient de quelques heures à quelques siècles.

Exemples déjà rencontrés : Sirius A, et B... et C.
Procyon A, et B.



Albireo.

étoile isolée et gravitation

Un corps léger (un astéroïde, une petite planète, un nuage gazeux, une vieille chaussure) orbitant autour d'une étoile simple décrit une ellipse.

L'orbite la plus simple est l'ellipse d'excentricité nulle : le cercle.

Pour un moment cinétique fixé (mesure de la quantité de rotation), l'orbite qui minimise l'énergie gravitationnelle est l'orbite circulaire.

On peut tracer les surfaces iso-potentielles : ce sont les surfaces où l'énergie gravitationnelle a une valeur constante.

Les orbites iso-potentielles d'une étoile (gravitation newtonienne) sont des sphères centrées sur l'étoile.

Les iso-potentielles sont toujours les orbites de moindre énergie suivies par de petits objets.

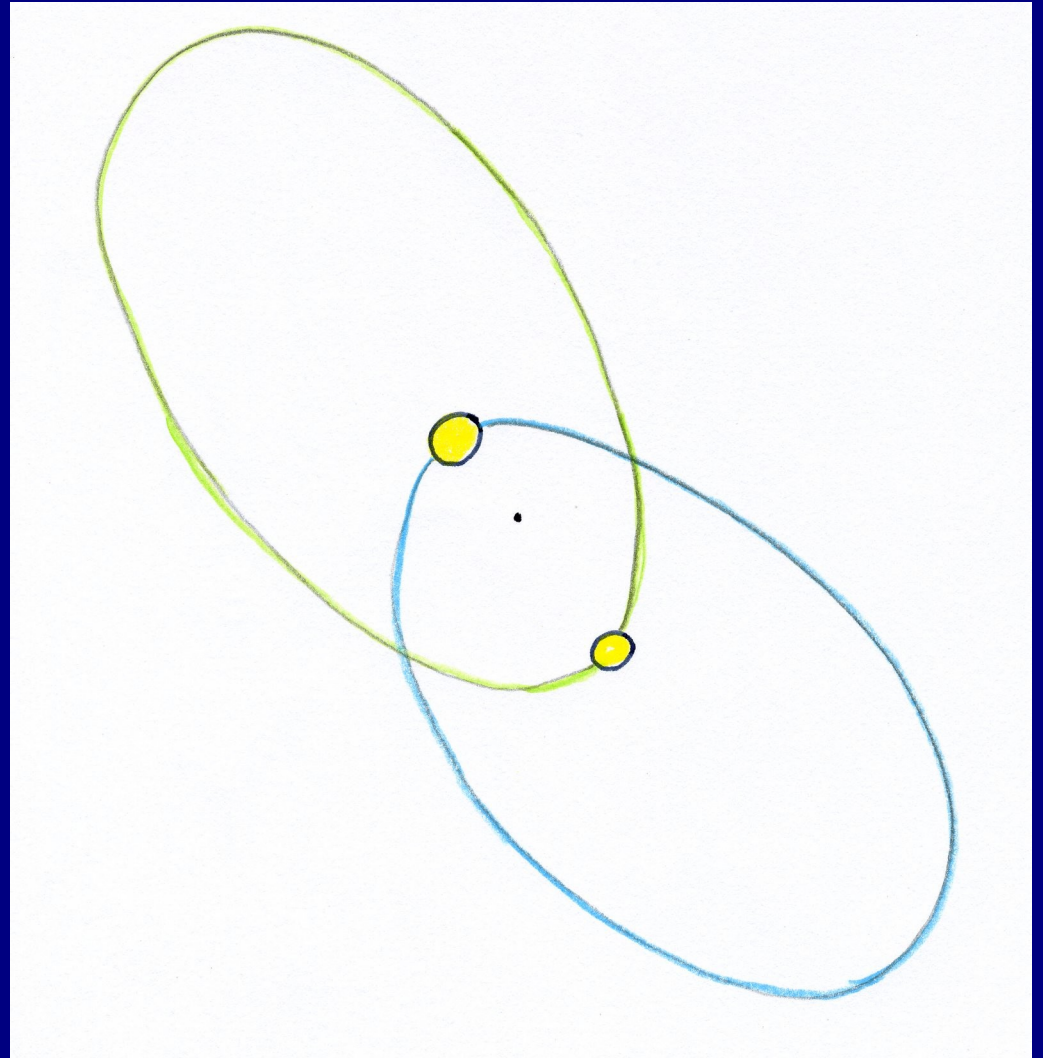
étoiles doubles et gravitation

Les deux étoiles « tournent l'une autour de l'autre ».

En fait, elles parcourent chacune une ellipse dont un foyer est le centre de masse du système formé par les deux étoiles.

Comme dans le cas d'une étoile isolée, les orbites (à moment cinétique constant) minimisant l'énergie de gravitation sont deux orbites circulaires.

Dans ce cas, les deux cercles ont le même centre, mais pas nécessairement (et même rarement) le même rayon.



Deux étoiles au périastre de leur orbite.

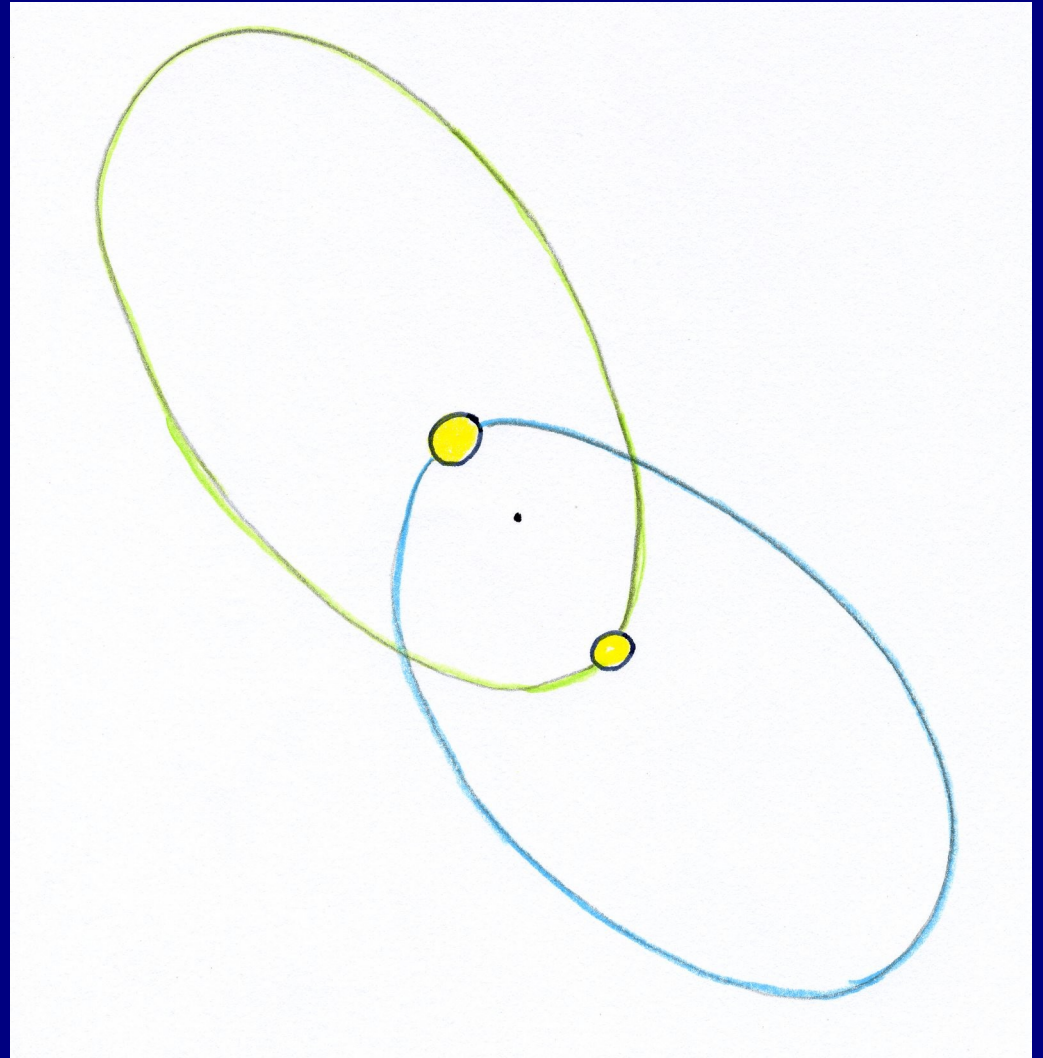
étoiles doubles et gravitation

Lorsque deux étoiles vivent ensemble, elles tendent à dissiper (effets de marées etc.) leur énergie gravitationnelle.

Elles tendent donc à réduire leur énergie gravitationnelle, donc à adopter des orbites circulaires.

C'est d'autant plus vrai que

- 1) Les étoiles sont rapprochées, ce qui augmente les effets de marée qui favorisent la dissipation de l'énergie de gravitation
- 2) que le système binaire est ancien, ce qui leur a laissé du temps pour rendre la dissipation effective .



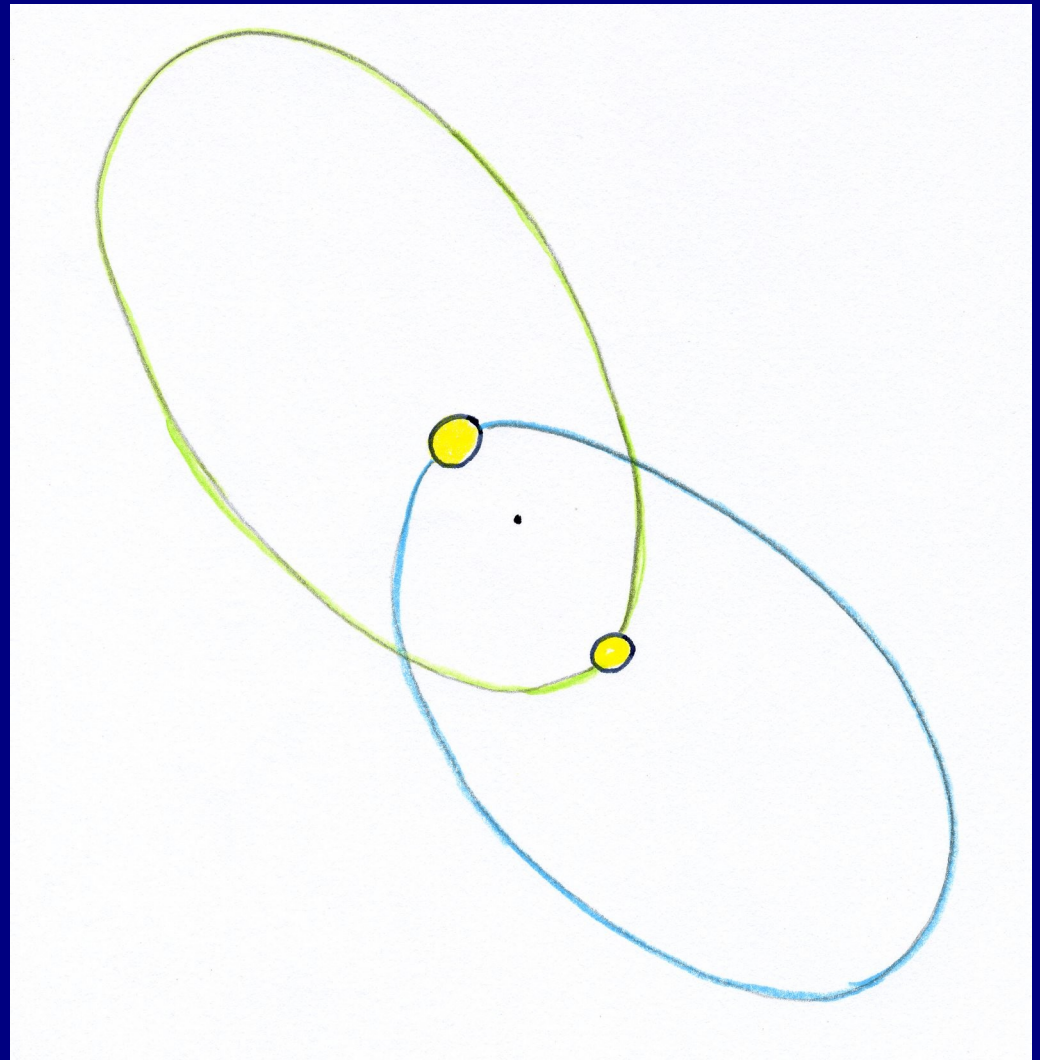
étoiles doubles et gravitation

On s'intéressera au cas où une des étoiles est compacte.

L'étoile compacte porte le numéro 1.

Si $M_1 > M_2$, on parle de binaire de grande masse. (l'étoile compacte est la plus massive.)

Si $M_1 < M_2$, binaire de faible masse (la compagne est la plus massive).



le potentiel de Roche

Les surfaces iso-potentielles d'un système binaire en rotation circulaire peuvent se représenter dans le repère en rotation avec le système.

Dans ce repère, les deux étoiles sont immobiles.

On peut calculer en chaque lieu (défini par le vecteur « $\mathbf{r}$ ») un **potentiel de gravitation**.

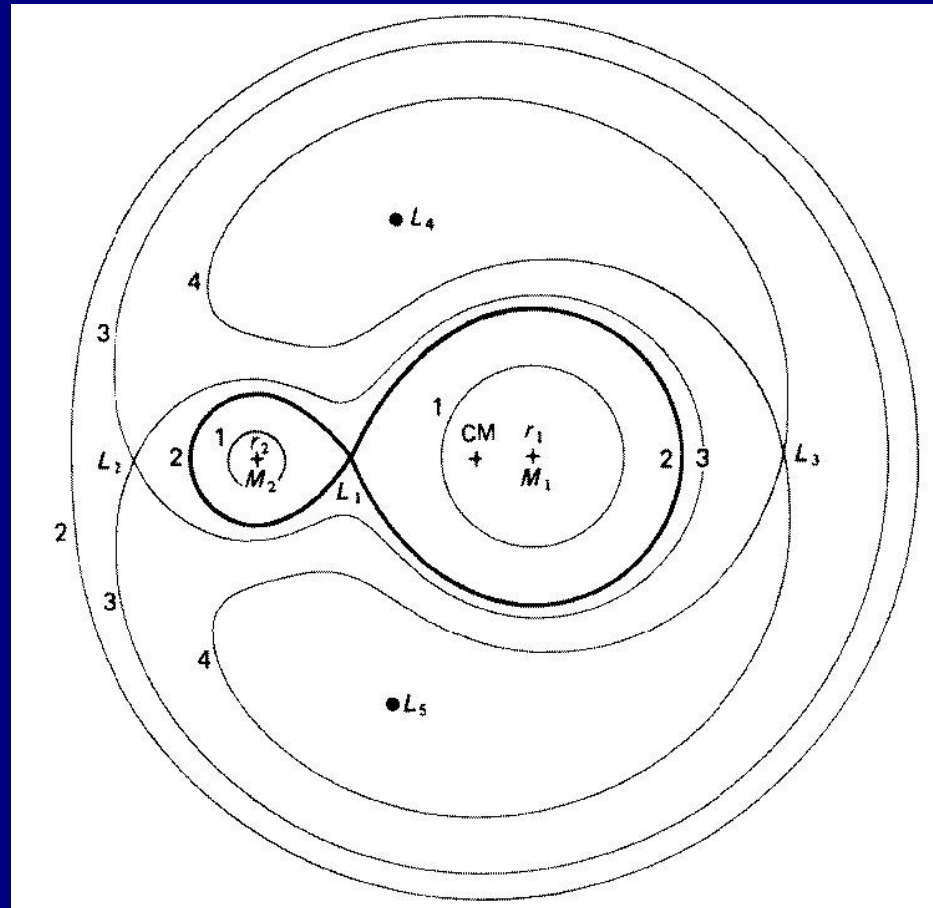
Un **petit corps** (un troisième) léger se promenant au voisinage des deux étoiles **tendra à se déplacer le long de lignes où le potentiel a la même valeur**.

Ce potentiel, dit potentiel de Roche comprend deux termes liés à la position et à la masse des étoiles, et un terme lié à la rotation du système.

$$\Phi_R(\mathbf{r}) := -\frac{GM_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_2|} - \frac{1}{2}(\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{r})^2$$

le potentiel de Roche

Un petit corps (un troisième) léger se promenant au voisinage des deux étoiles **tendra à se déplacer le long de lignes où le potentiel a la même valeur.**



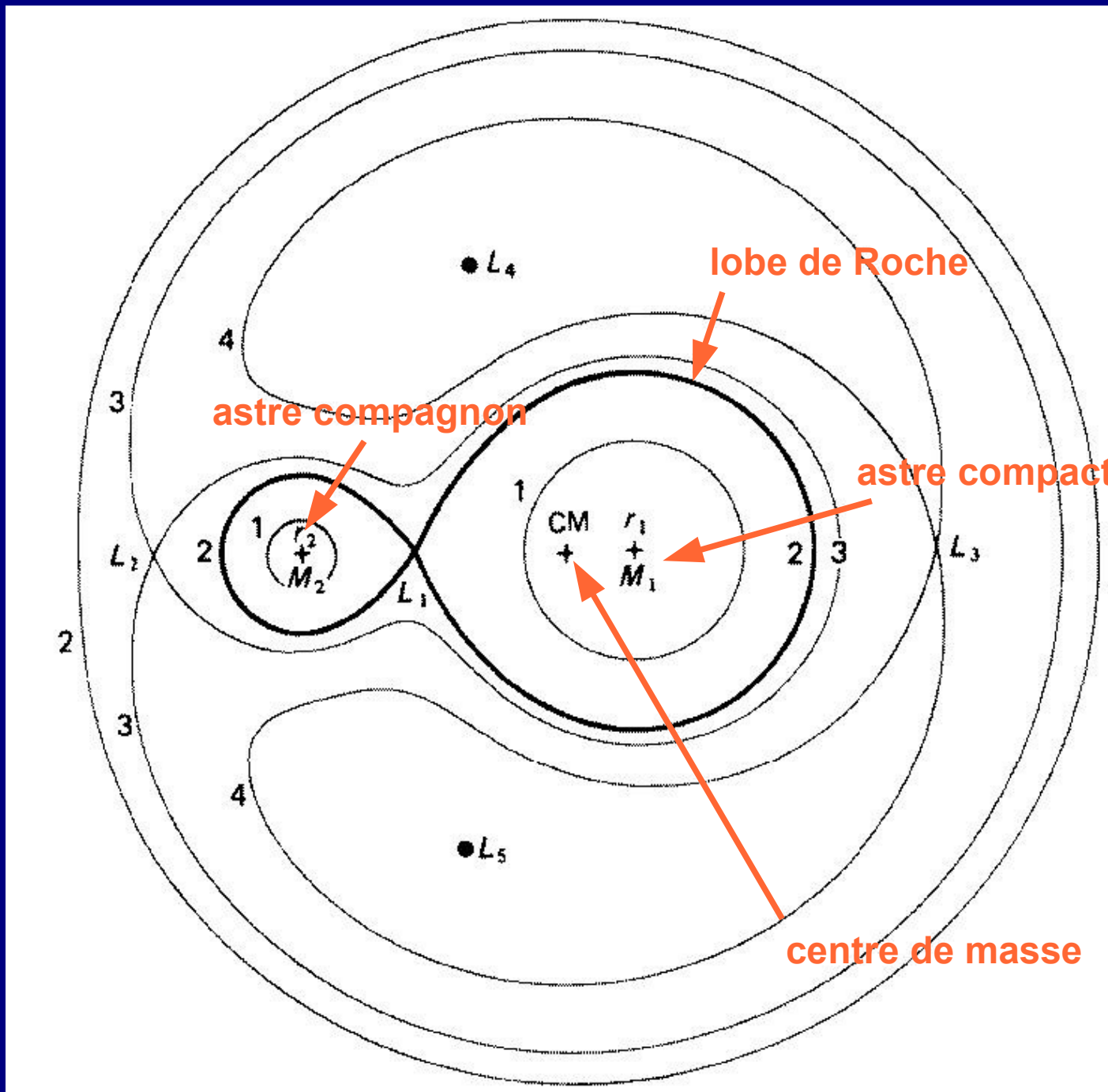
$$\Phi_R(\mathbf{r}) := -\frac{GM_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_2|} - \frac{1}{2}(\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{r})^2$$

le potentiel de Roche, equation dynamique

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + 2 \boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - \nabla \Phi ,$$

$$\Phi := \Phi_1 + \Phi_2 - \frac{1}{2} (\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{r})^2 .$$

$$\Phi_{\text{R}}(\mathbf{r}) := -\frac{GM_1}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}_2|} - \frac{1}{2} (\boldsymbol{\Omega} \wedge \mathbf{r})^2$$



L'astre le plus massif 1) est le plus près du centre de masse 2) a le plus grand lobe de Roche

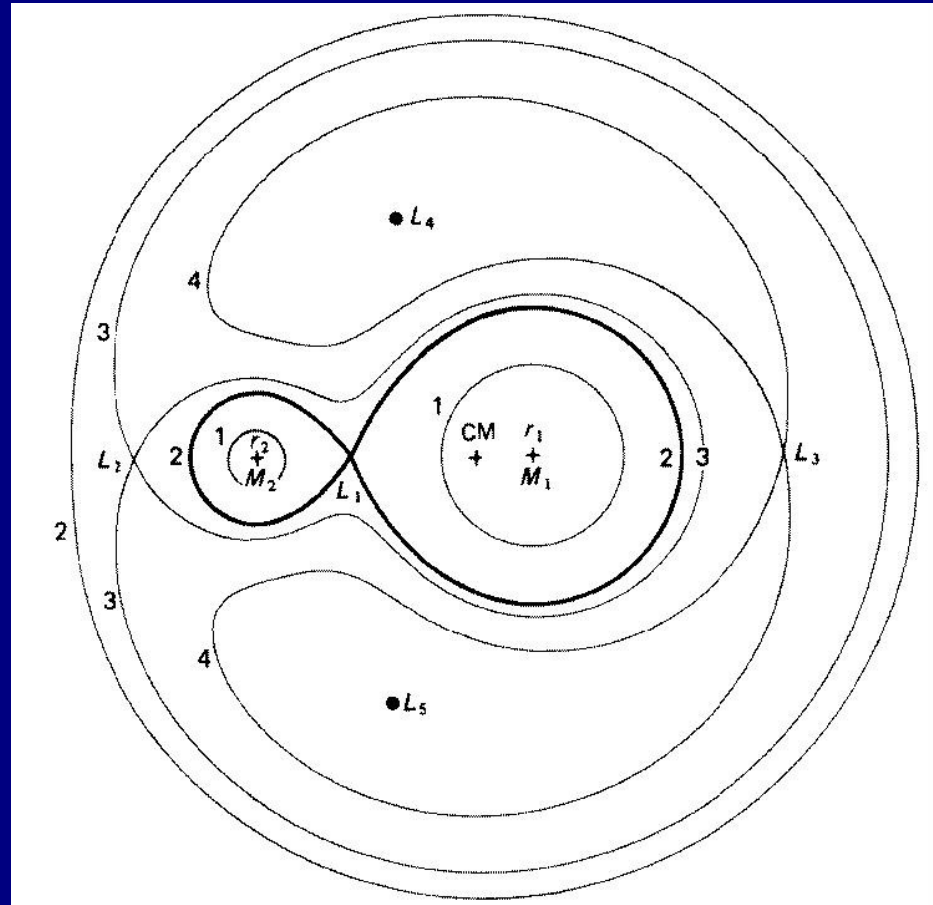
trois cas avec le potentiel de Roche

Plusieurs cas de figure :

binaires séparées : aucune étoile n'emplit son lobe de Roche. Cas d'Albiréo. On verra les binaires X de grande masse,

binaires semi-séparées : variables cataclysmiques, binaires X de faible masse, certaines binaires X de grande masse.

système en contact : les deux astres emplissent leur lobe de Roche. Cas de W de la Grande Ourse. Impossible avec un astre compact.



Binaires X de grande masse

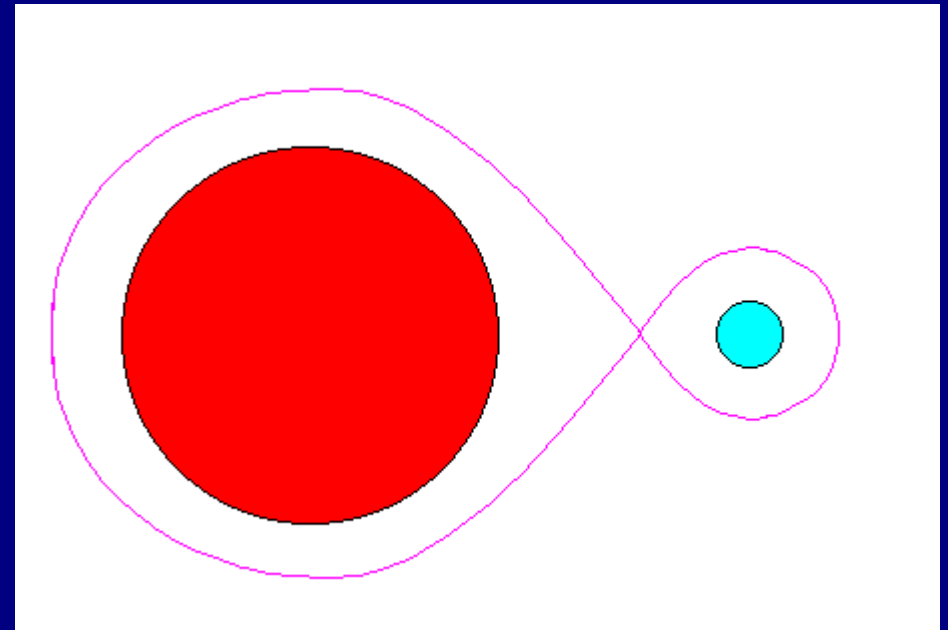
(HMXB : High Mass X Binary)

binaires séparées.

L'étoile compagnon ne remplit pas son lobe de Roche.
Rien de particulier ne devrait se passer...

... sauf si l'étoile compagne fait du vent.

Le vent stellaire, de faibles quantités de matières expulsées de l'étoile, atteignent nécessairement le lobe de Roche. Le vent est alors capturé dans le lobe de Roche de l'étoile compacte, tourne autour d'elle, y tombant lentement, en tournant.



L'exemple de la HMXB

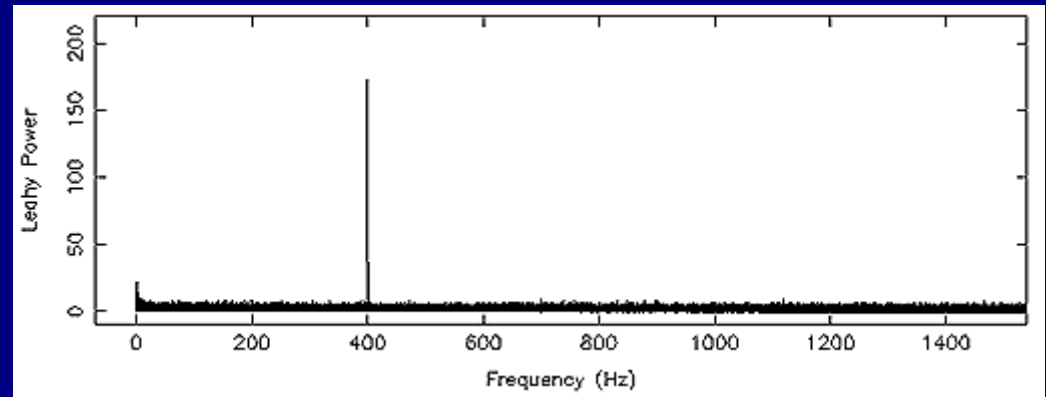
XTE J1808-369

On avait commencé par détecter un pulsar milliseconde. C'est un pulsar X (vu par SAX). On n'observe pas de contrepartie radio.

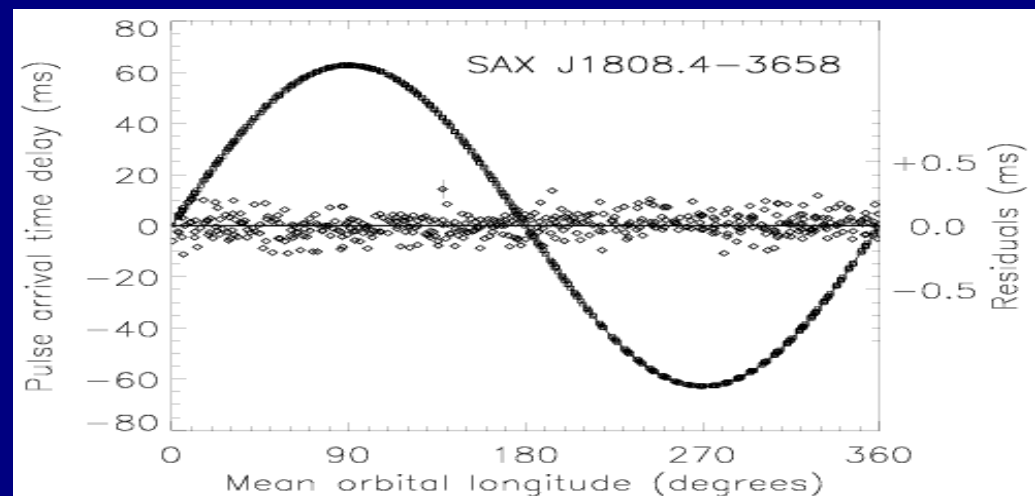
[Wijnand and Klis, 1996]

Puis on vit que sa période est modulée sur une période de 2,01 heures, donc que l'étoile à neutrons est dans un système binaire. L'orbite est circulaire et le compagnon est une étoile légère de 0,1 masse solaire.

[Chakrabarty and Morgan]



Spectre du PSR, sa fréquence (401 Hz) correspond à une période de 2,5 ms.



Résidus de la période du PSR J1808-369

L'exemple de la HMXB XTE J1808-369

La surface du PSR est chaude et émet des rayons X.

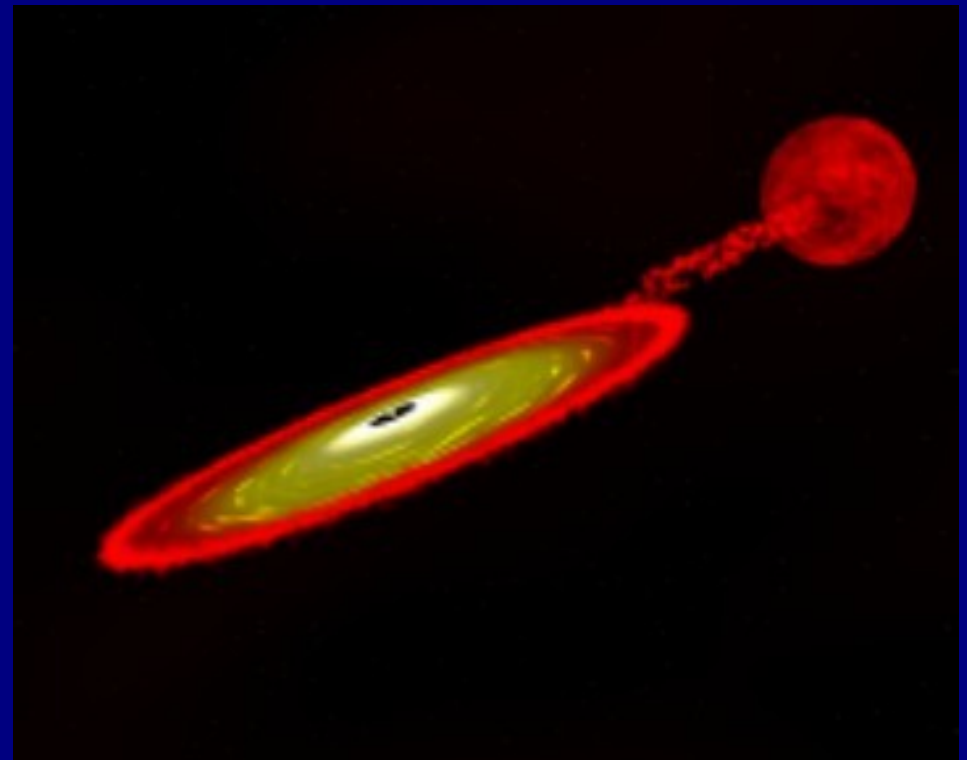
Les rayons X arrivent sur la compagne et provoquent une évaporation rapide de sa haute atmosphère, créant un vent stellaire. Le vent est assez fort pour évaporer l'enveloppe de l'étoile en 10 ou 100 millions d'années.

Le vent de la compagne atteint le lobe de roche, et finit par tomber sur le pulsar.

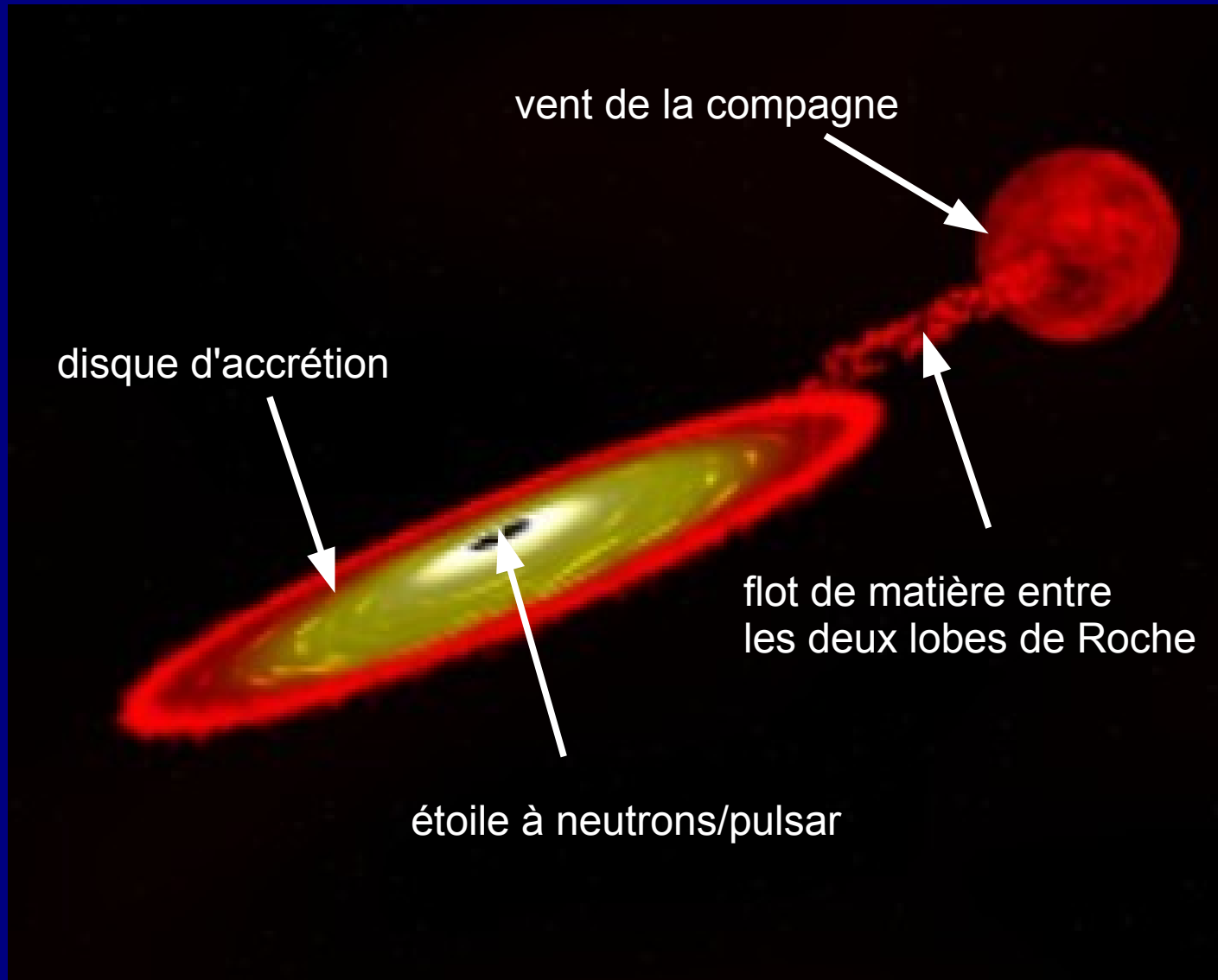
Cette chute de matière en rotation

- 1) fait écran au signal radio
- 2) accroît la fréquence du pulsar

On pense observer la création d'un pulsar milliseconde.



L'exemple de la HMXB XTE J1808-369



Le recyclage des pulsars milliseconde

Les jeunes pulsars tournent souvent vite, en quelques millisecondes (Crabe, Vela, dans SNR historiques...)

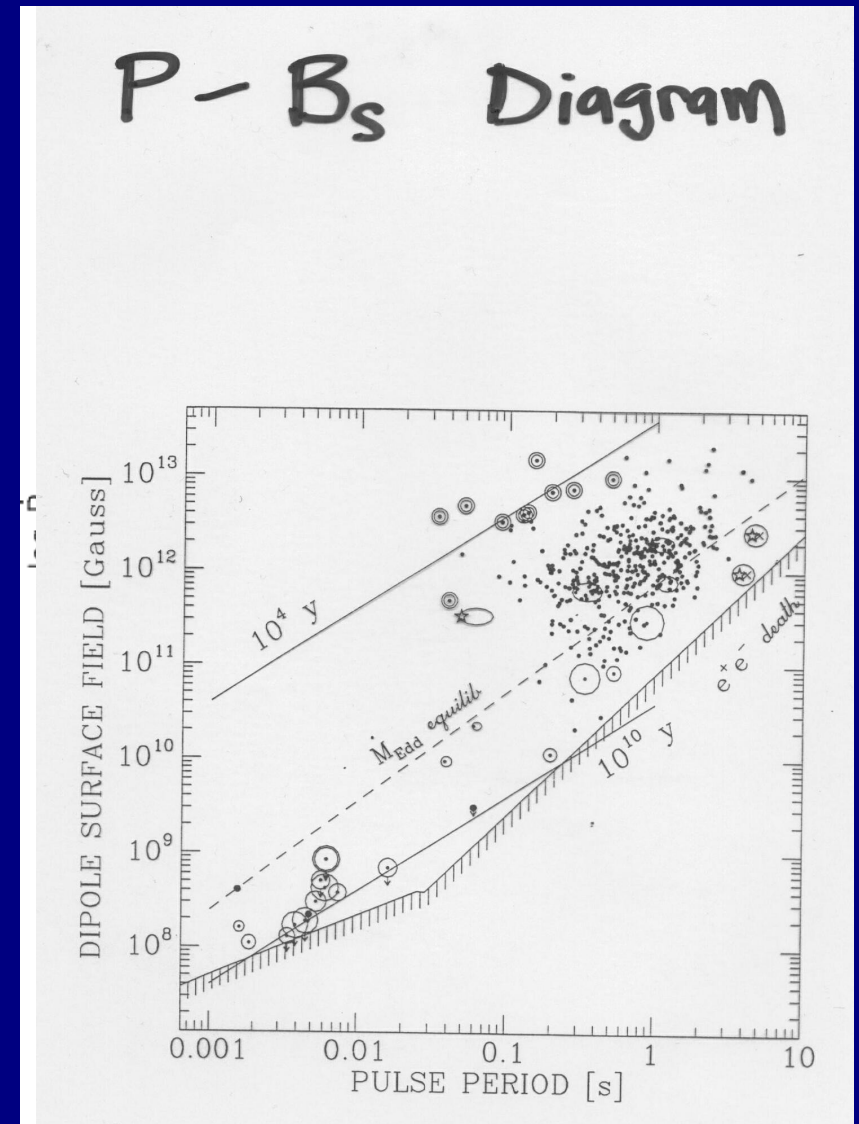
Mais ils dissipent leur énergie de rotation et ralentissent. Leur fort champ magnétique accroît la dissipation.

En deçà d'une certaine vitesse (ligne de mort), il n'émettent plus de pulsation.

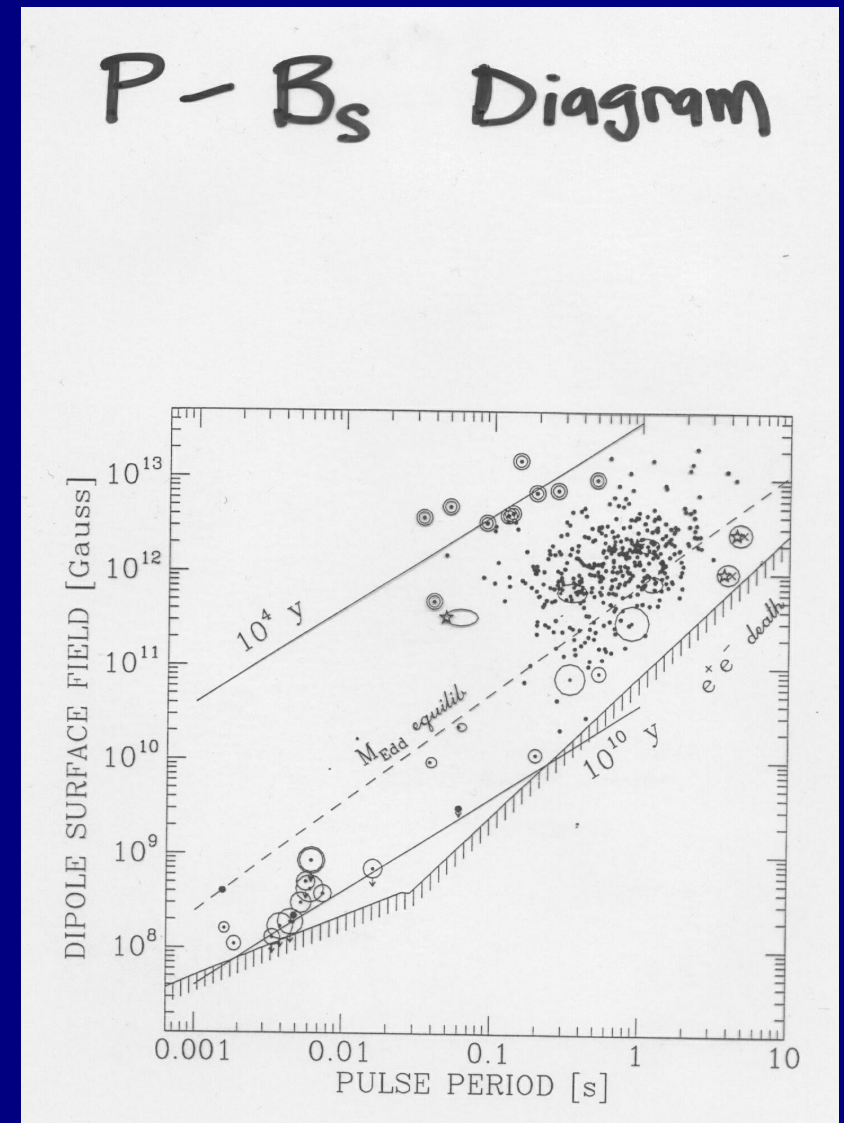
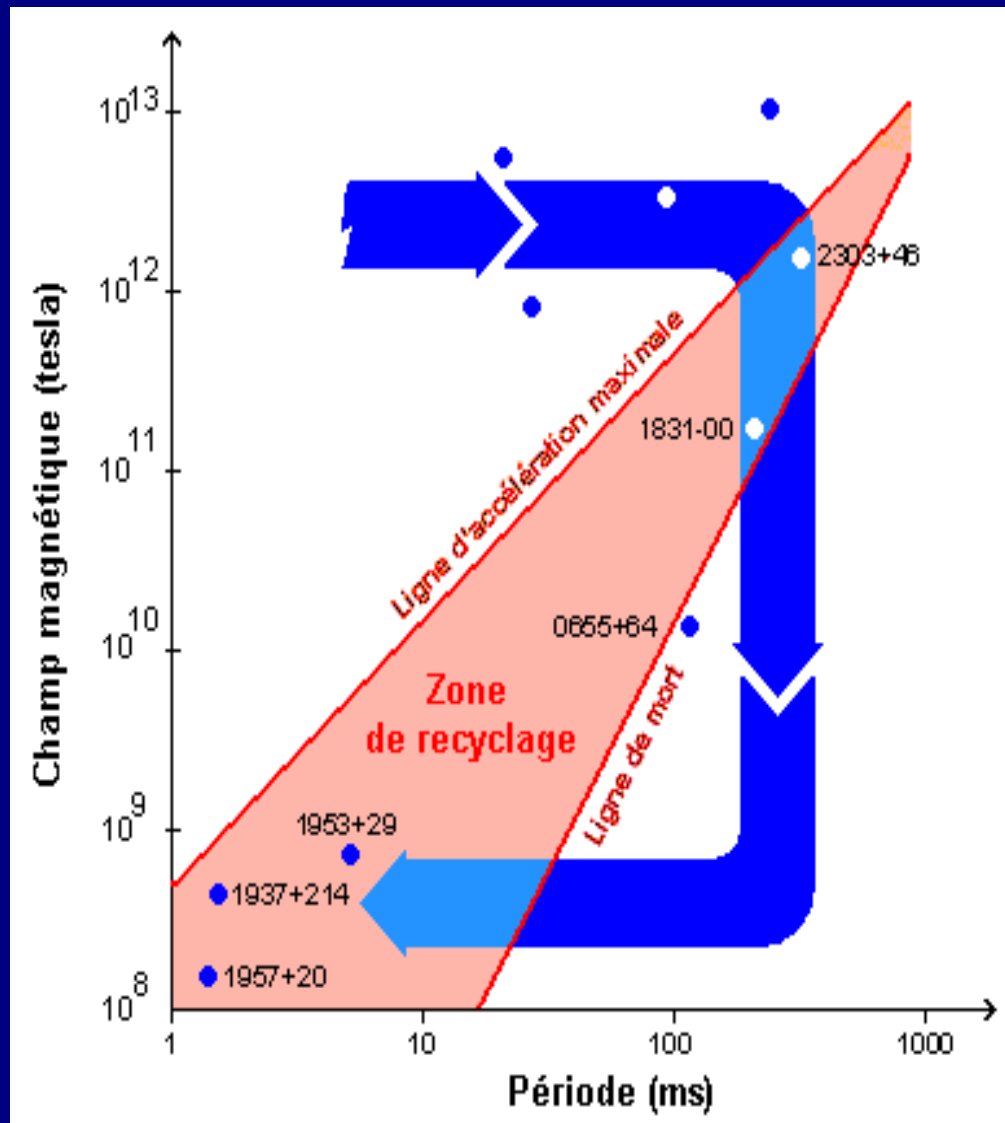
Néanmoins l'étoile à neutrons continue d'exister et de tourner.

Dans le cas des étoiles à neutrons dans un système binaire, il arrive que l'accrétion de matière venant de la compagne ré-accélère l'étoile à neutrons, qui redevient un pulsar milliseconde.

Tous les pulsars milliseconde anciens (non historiques) sont dans un système binaire.



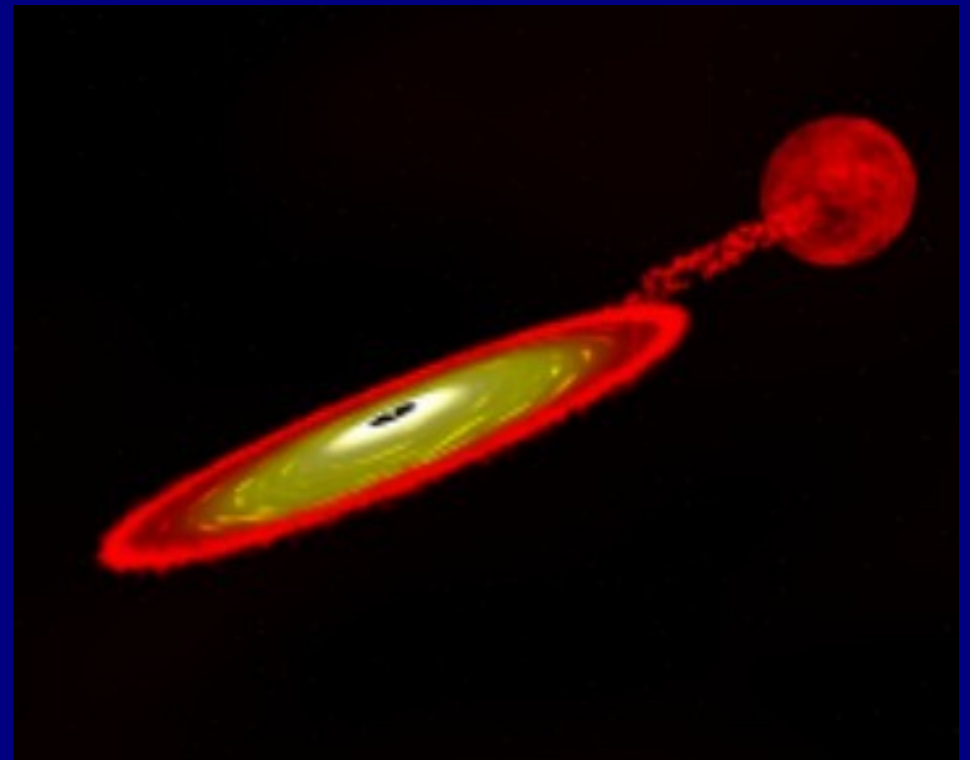
Le recyclage des pulsars milliseconde



L'exemple de la HMXB XTE J1808-369

C'est le seul pulsar connu en cours de régénération.

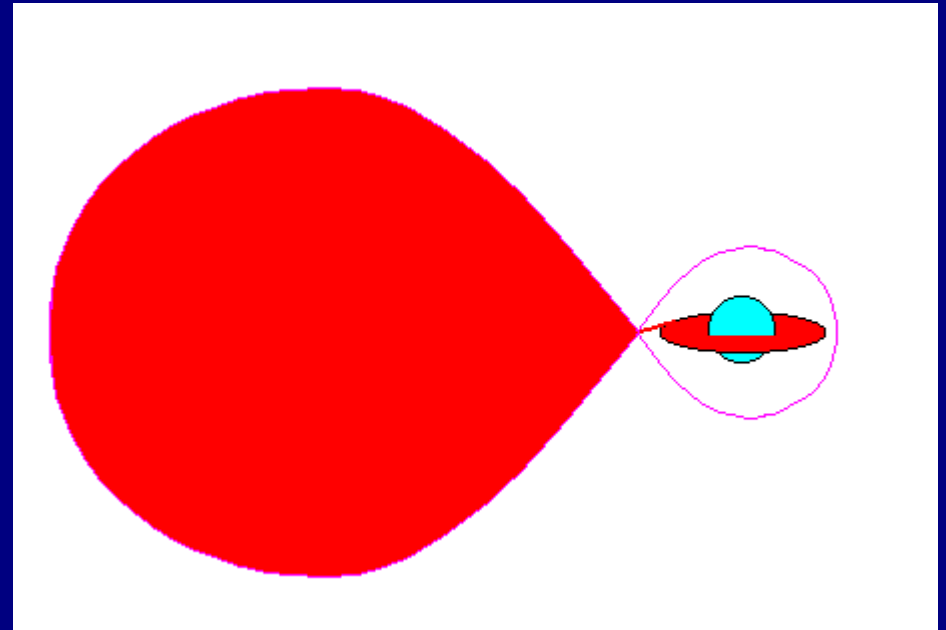
Les autres pulsars milliseconde « vieux » (non historiques, à faible champ magnétique) ont achevé leur phase de ré-accélération, et on n'y observe pas l'accrétion de matière venant de la compagne.



Binaires semi-séparées et accrétion

La matière échappée de l'étoile compagne qui emplit son lobe de Roche tombe sur l'étoile compacte.

Accrétion de matière.



Binaires semi-séparées et accrétion

La matière échappé de l'étoile compagnon qui emplit son lobe de roche tombe sur l'étoile compacte.

Accrétion de matière.

Quand les étoiles sont très serrées, même une étoile compacte peut emplir son lobe de roche.

C'est le cas d'une étoile double, source intense de rayons X dans l'amas globulaire NCG 6624 dans la constellation du Sagittaire.

La source 4U 1820-30 dans NGC6624.

On observe des sursauts d'émission en rayons X.

Interprétation (non triviale) : la compagne remplit son lobe de Roche. De la matière tombe continuellement vers la compacte (une étoile à neutrons), en formant un disque d'accrétion. Les sursauts X sont causés par des instabilités du disque d'accrétion, ou la combustion de l'hélium sous la surface de l'EN.

Dans le cas de 4U 1820-30, La période orbitale des deux étoiles est de 11 minutes !

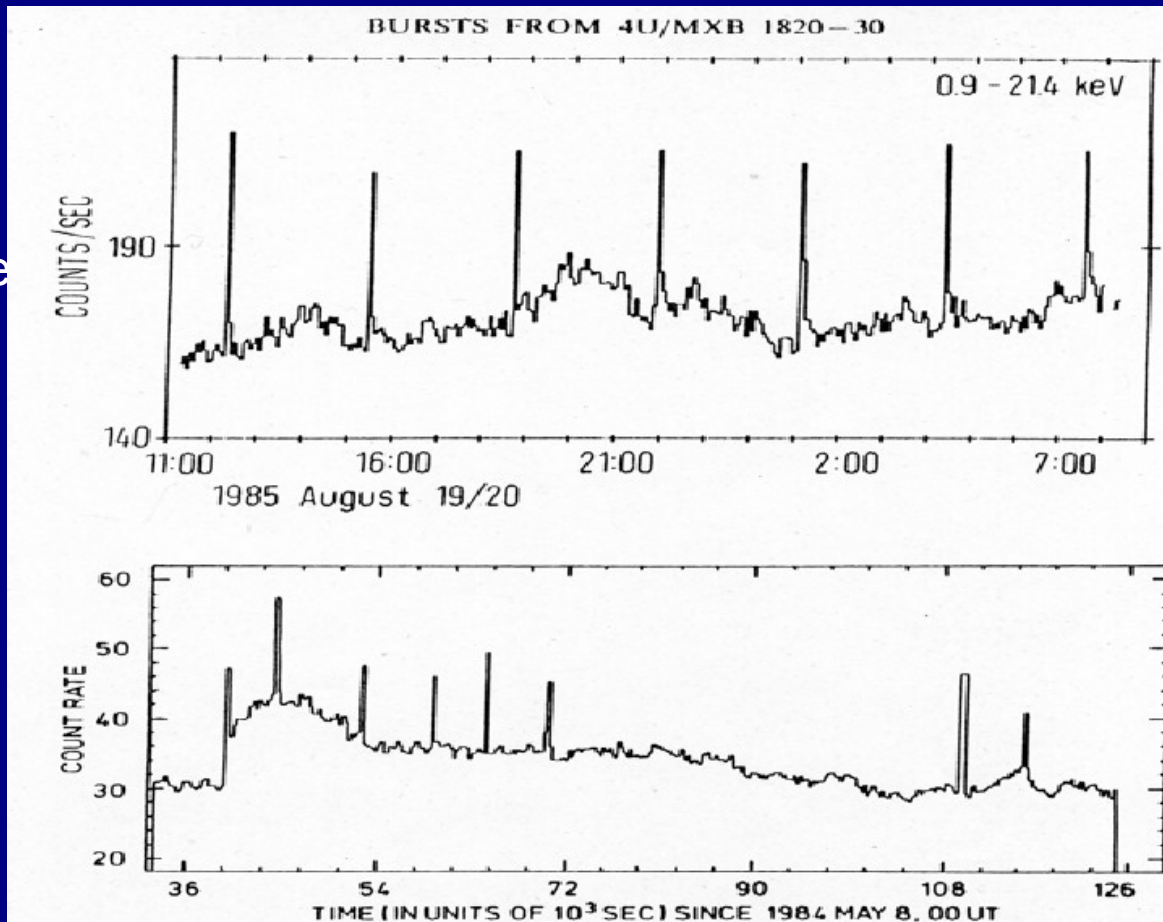


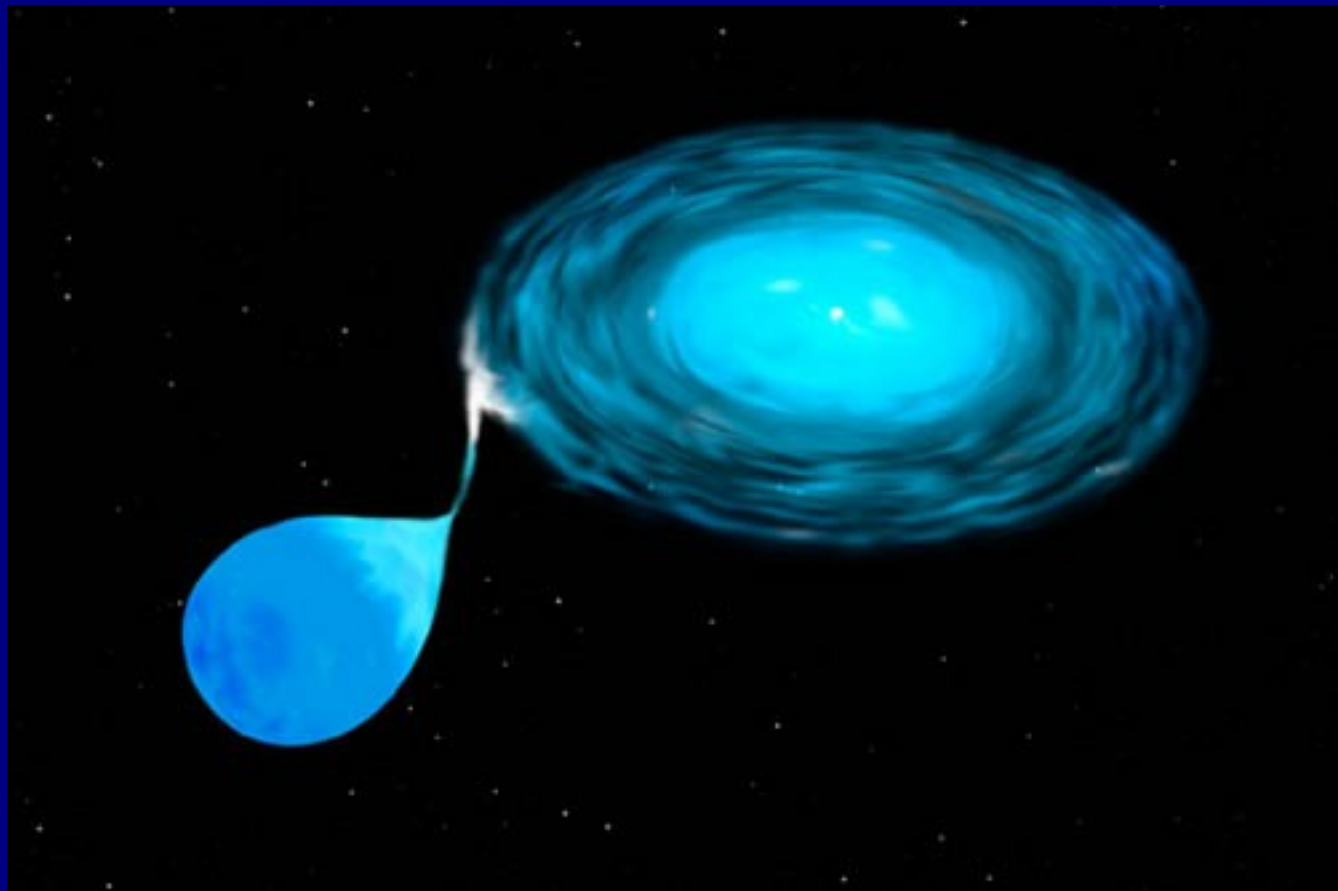
Fig. 3.14. (a) Example of a very regular burst recurrence pattern, observed for 1820-303 (from Haberl *et al.* 1987). (b) Irregular burst recurrence, observed from 1636-536 (from Sztajno *et al.* 1985).

La LMXB 4U 1820-30 dans NGC6624.

La période orbitale des deux étoiles est de 11 minutes !

Les deux étoiles sont très proches.

La compagne ne peut être plus grande qu'un naine blanche.



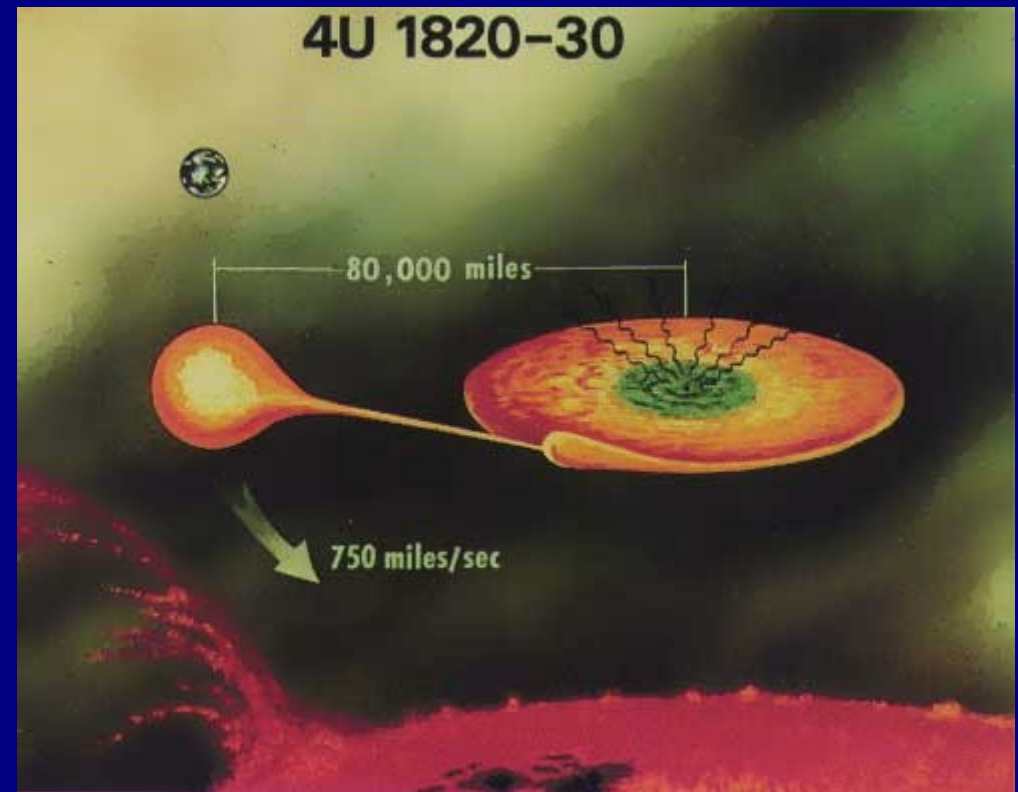
La LMXB 4U 1820-30 dans NGC6624.

La période orbitale des deux étoiles est de 11 minutes !

Les deux étoiles sont très proches.

La compagne ne peut être plus grande qu'un naine blanche.

Ce dessin (notez la liberté dans le choix des couleurs) permet de comparer la dimension du système 4U 1820-30 et celle du Soleil.



La LMXB 4U 1820-30 dans NGC6624.

C'est la plus courte période connue. (La plus longue période de LMXB connue est 17 jours.)

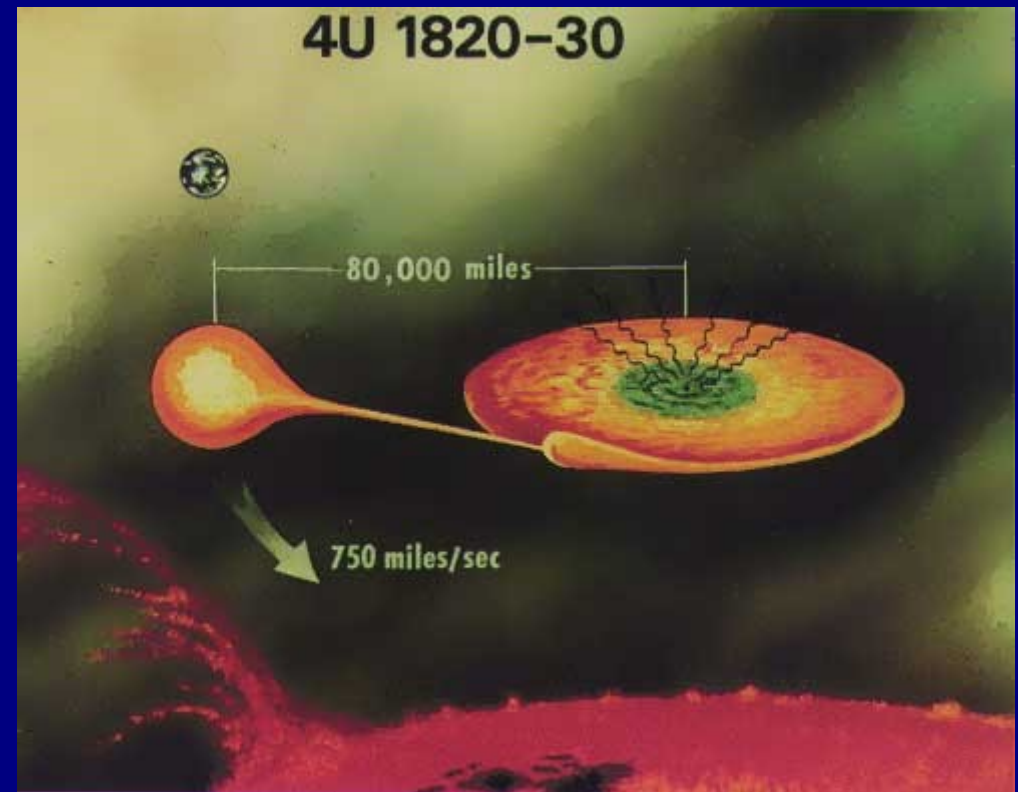
Comment deux étoiles peuvent-elles être aussi proches ?

Dans leur phase de séquence principale, chacune des étoiles aurait englobé l'autre.

Donc l'étoile à neutrons (plus massive) a dû capturer la naine blanche dans une phase tardive (déjà compacte) de son évolution. Ce n'est donc pas une binaire « ordinaire. »

Permettre de telles captures exige une forte densité d'étoile : cœur d'un amas globulaire. C'est le cas ici, amas globulaire NGC6624.

Ce dessin (notez la liberté dans le choix des couleurs) permet de comparer la dimension du système 4U 1820-30 et celle du Soleil.



Des binaires X dans l'amas 47 Tuc.

47 Tucanae est un vieil et très gros amas globulaire.
Comme il est relativement proche, il est abondamment étudié.

On se demandait si on pourrait trouver un trou noir au centre de cet amas, comme il y en a au centre de certaines galaxies (avec l'espoir de trouver des trous noirs intermédiaires ?).

On fit des observations en X, car les gaz tombant en accrétion autour d'un trou noir émettent beaucoup de rayons X.

Des binaires X dans l'amas 47 Tuc.

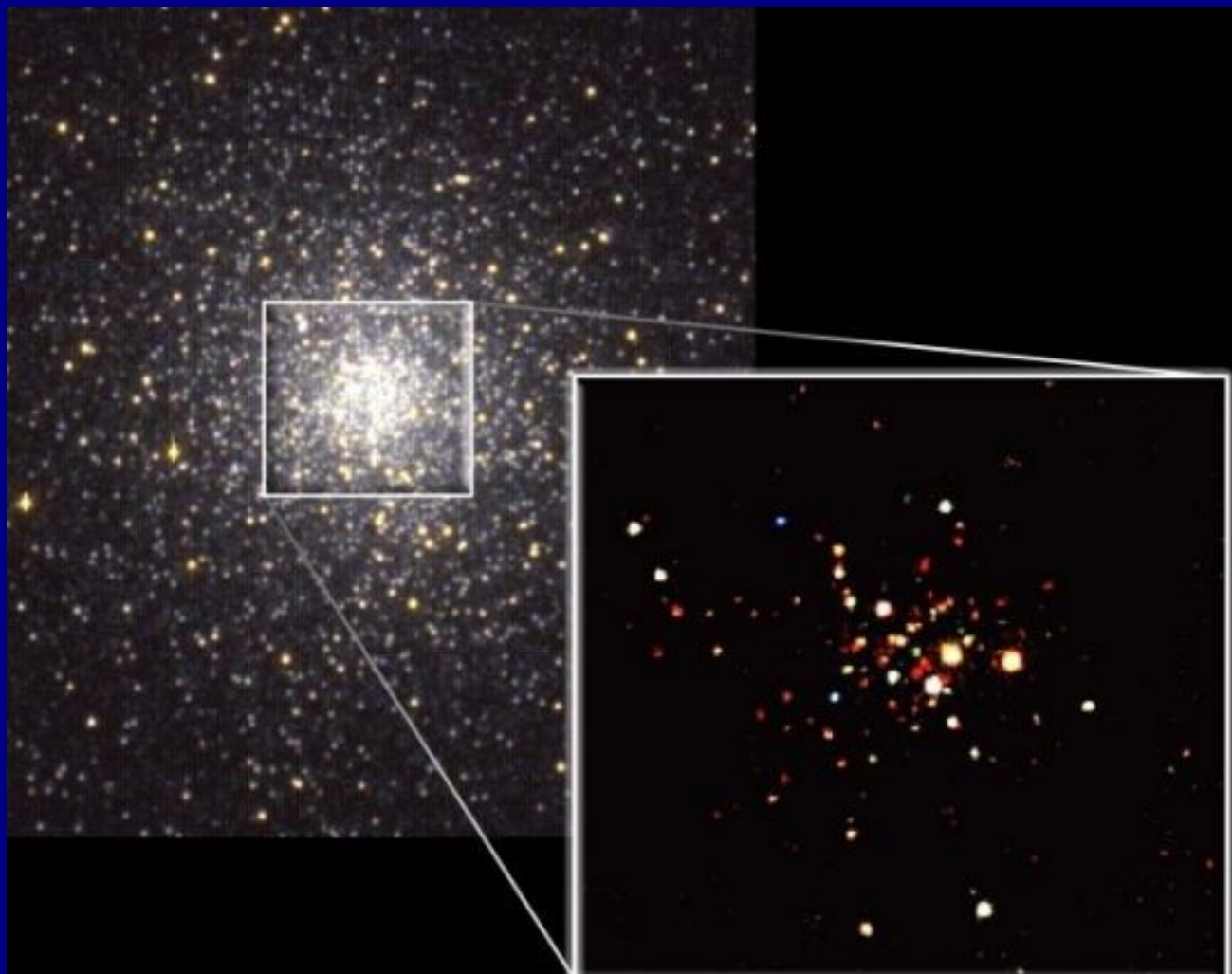
On ne voit pas de trou noir central.

On aurait pu s'attendre d'autre part à observer des populations d'étoiles vieilles, et supposer l'existence d'étoiles compactes « quasi-éteintes. »

On y voit en fait de nombreuses binaires X. Cela s'explique par la forte densité d'étoiles favorisant les captures, notamment par des étoiles compactes.

Image en optique, et zoom du centre en X.

[X : Grindlay, CXO Nasa
optique : Keel, T 1.5m CTIO]



Des binaires X en général.

On en connaît plus d'une centaine (175 LMXB).

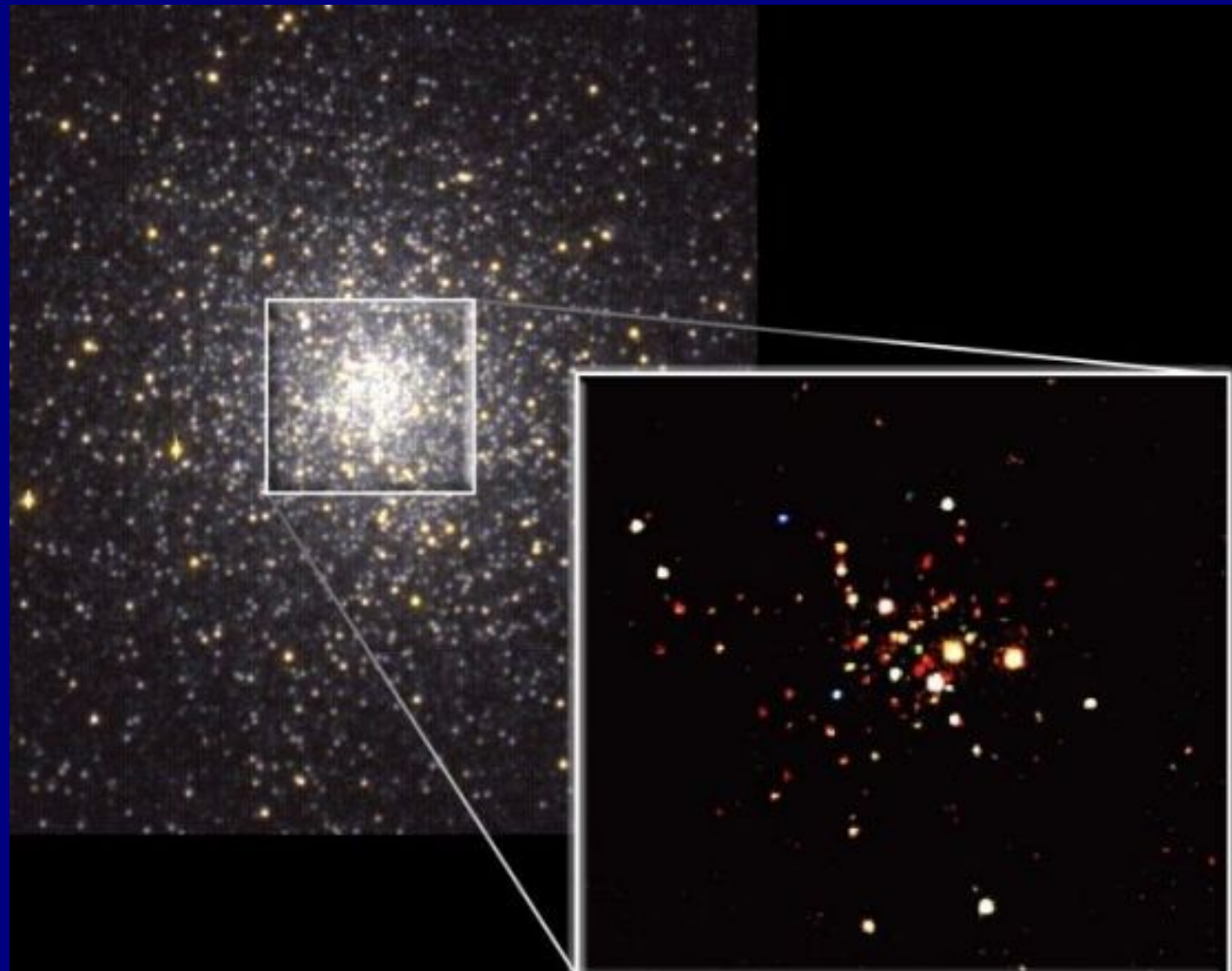
L'astre compact est une étoile à neutrons ou un trou noir (il est parfois difficile de distinguer les deux cas).

On reconnaît mieux les EN lorsqu'elles sont en même temps des pulsars.

Leur fonctionnement est loin d'être entièrement compris.

Image en optique, et zoom du centre en X.

[X : Grindlay, CXO Nasa
optique : Keel, T 1.5m CTIO]



Les variables cataclysmiques

L'étoile compacte est une naine blanche. La naine blanche est entourée d'un disque d'accrétion, de matière issue de la compagne.

Représentation d'une nova naine :
une variable cataclysmique dont la
compagne est une étoile de la
séquence principale de type K.

(Les étoiles K sur la séquence principale
sont les plus répandues.)

[Mark A. Garlick]



Les variables cataclysmiques

L'étoile compacte est une naine blanche. La compagne emplit son lobe de Roche (binaire semi-séparée).

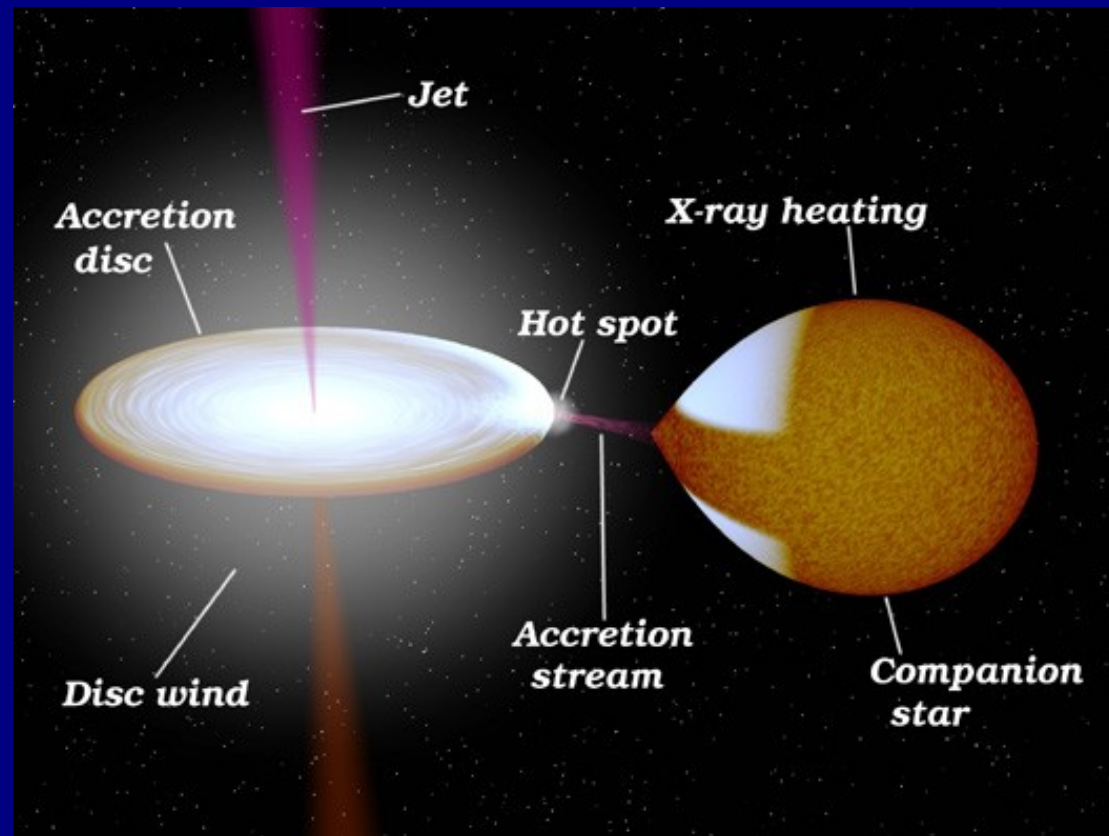
La naine blanche est entourée d'un disque d'accrétion formé de matière issue de la compagne.



variables cataclysmiques, novae

Plusieurs cas de figure :

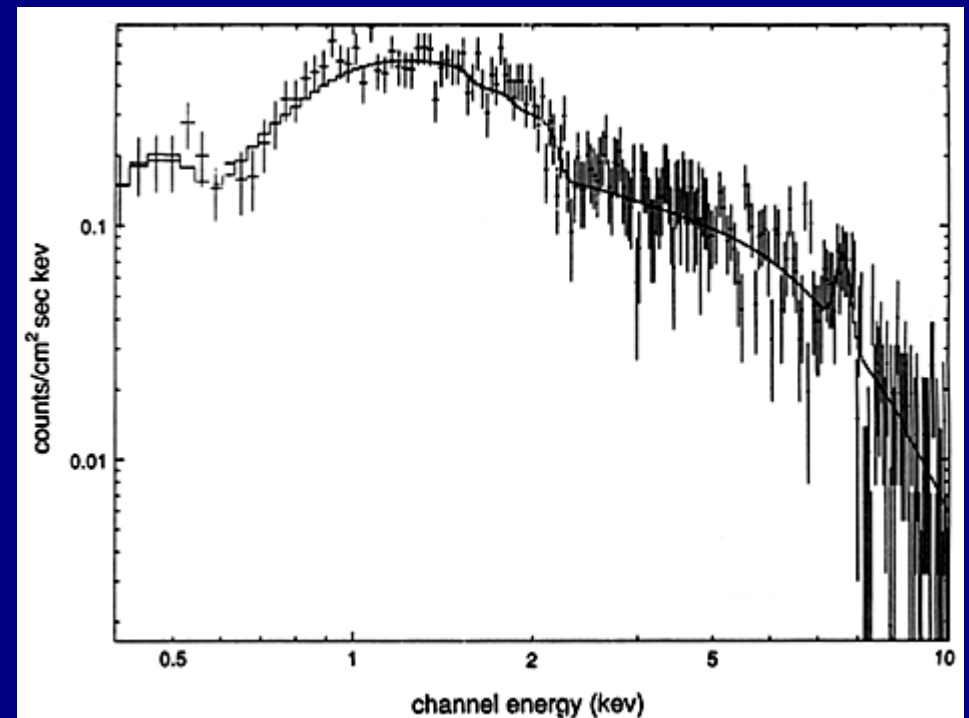
binaires semi-séparées :
variables cataclysmiques,
binaires X de faible masse,
certaines binaires X de grande
masse.



Les variables cataclysmiques

Le spectre (en optique, UV ou X) révèle des raies spectrales de carbone et d'oxygène permettant de caractériser l'étoile compacte comme une naine blanche. (Une étoile à neutrons n'a pas d'éléments aussi légers).

Ce spectre (en X) de la variable cataclysmique BY Cam révèle la présence de matière chauffée à 300 000 K, d'oxygène, de carbone (avec plus d'oxygène que dans une naine blanche standard), et de fer partiellement ionisé.

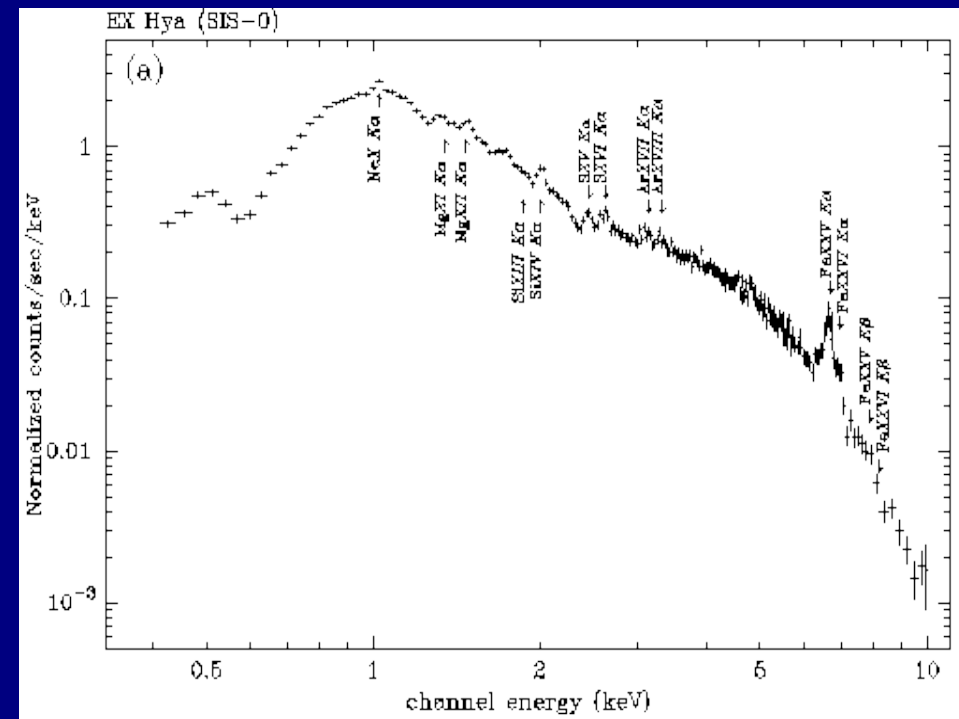


Les variables cataclysmiques

Le spectre (en optique, UV ou X) révèle des raies spectrales de carbone et d'oxygène permettant de caractériser l'étoile compacte comme une naine blanche. (Une étoile à neutrons n'a pas d'éléments aussi légers).

Le spectre (en X) de la variable cataclysmique EX Hydra révèle la présence de plasmas dont les températures vont de 10 000 000 à 50 000 000 K. On observe des raies de Ne, Mg, Si, S, Ar, Fe. Ce sont des raies d'émission : ces éléments sont vus dans une région optiquement mince (en X) autour de l'étoile.

Cette variable cataclysmique possède en outre un champ magnétique élevé.

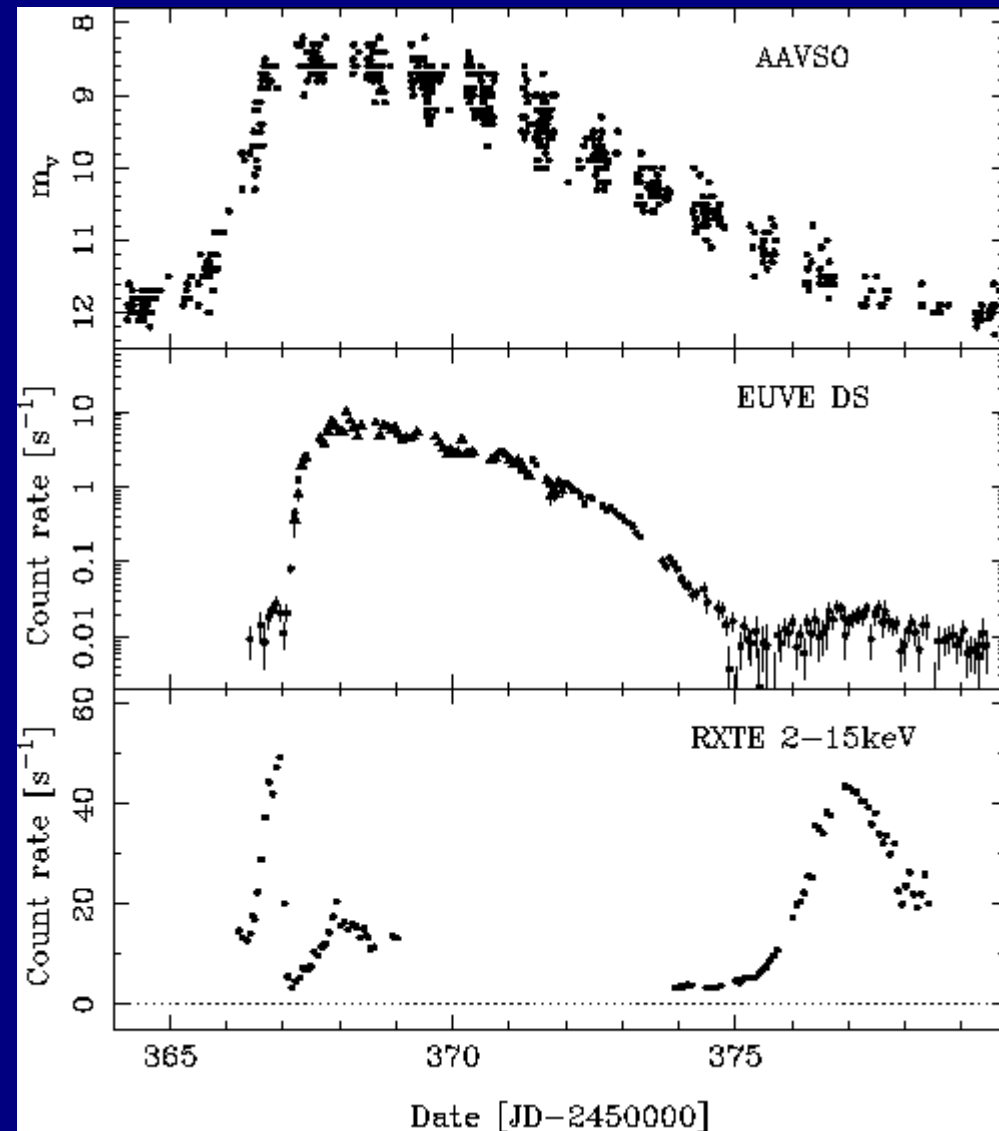


Les variables cataclysmiques

Les explosions se produisent-elles régulièrement ? souvent ?

SS Cyg est surveillée depuis environ 100 ans. Ses éruptions ont été découvertes en optique, mais on la surveille aussi en d'autres domaines. Ici les courbes de lumière en visible (haut), UV lointain, et X. Le temps est en jours.

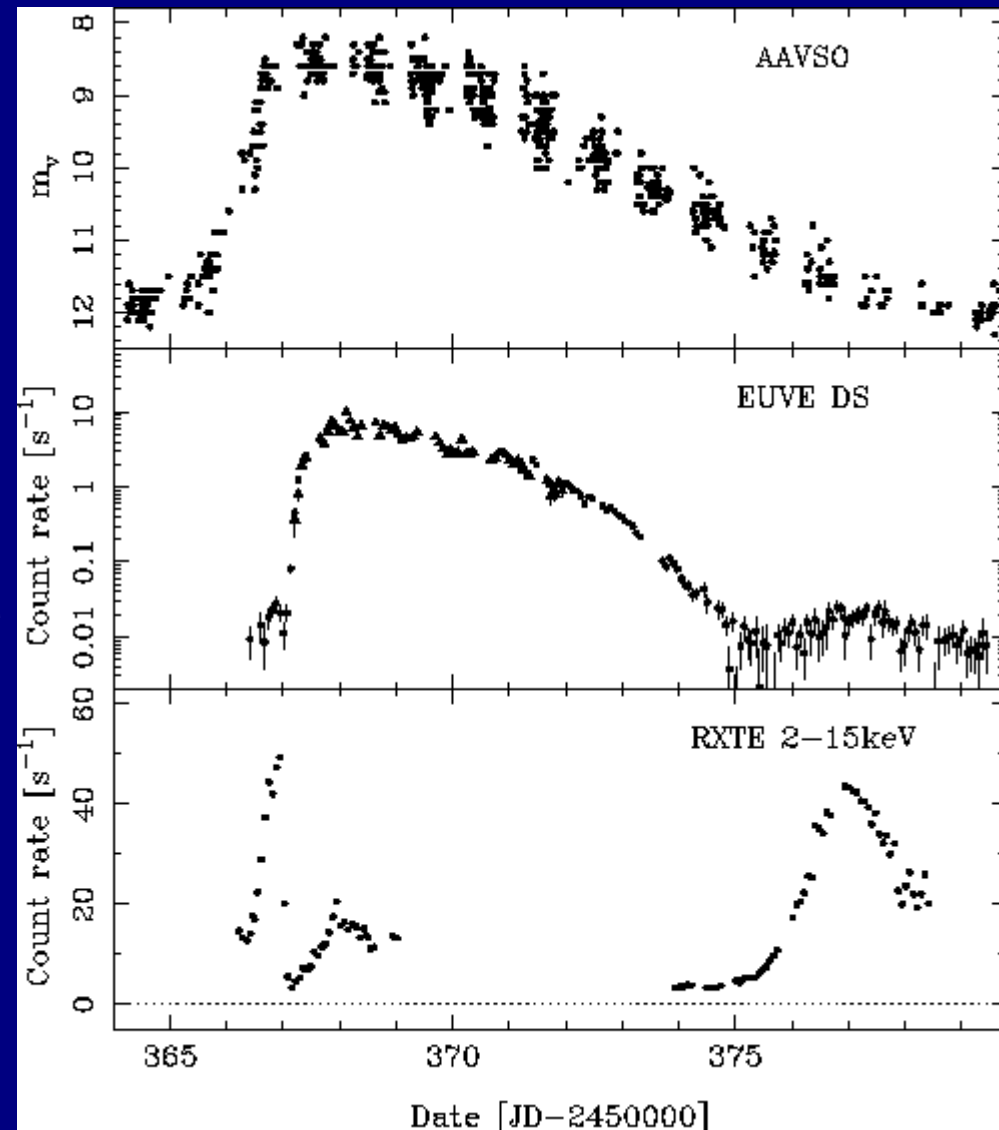
La période orbitale est 6,6 heures. Elle a une éruption environ tous les 50 jours pendant laquelle elle gagne 3,5 magnitudes.



Les variables cataclysmiques

Le mécanisme des éruptions.

La matière issue de la compagne s'accumule dans le disque d'accrétion (phase de quiescence) . Quasi-régulièrement, le disque d'accrétion se déstabilise et de la matière tombe directement sur l'étoile. De ce fait, la matière perd de l'énergie de gravitation. Cette énergie est transformée, notamment en radiations, qui expliquent la brillance des novae.



Supernova Ia

A chaque éruption, une binaire cataclysmique reçoit de la matière du disque d'accrétion.

L'énergie gravitationnelle diminuant est transférée à l'extérieur, avec à l'occasion, de l'expulsion de matière (donc augmentation de l'énergie gravitationnelle de la matière expulsée).

Le bilan penche néanmoins pour l'accumulation de matière.

Or un jour... la naine blanche atteindra la masse de Chandrasekhar.

Supernova Ia

Une naine blanche d'une binaire cataclysmique peut-elle accumuler de la masse au point d'atteindre la masse de Chandrasekhar ?

La densité centrale d'une naine blanche atteignant MC est
densité = $2,7 \cdot 10^{13} \text{ kg / m}^3$.

Mais... la naine blanche possède beaucoup de carbone (carbone, oxygène, quasiment pas d'hydrogène), et pour une densité de 10^{12} kg/m^3 , la fusion du carbone démarre.

Une telle densité est atteinte pour une masse totale très proche de MC.

Supernova la

Comme la naine blanche est dégénérée, sa pression dépend peu de la température.

Or la température augmente avec la fusion du carbone, et une température plus haute favorise la fusion du carbone restant.

Donc les réactions nucléaires s'emballent sans que la pression augmente...

Jusqu'à un stade où la température est telle que, malgré la densité élevée, la matière n'est plus dégénérée.

L'étoile, alors, explose.

L'énergie des supernovae Ia

Comme cette explosion se produit toujours à partir de naines blanches ayant grosso modo la même composition chimique et la même masse (très proche de M_C), ces explosions se déroulent de la même manière et libèrent la même quantité d'énergie.

L'étoile explose et libère une énergie de $E = 10^{44}$ Joules, ce qui représente la combustion nucléaire

$E = 5 \cdot 10^{-4} M c^2$, où M est la masse de la naine blanche.

Une telle libération d'énergie permet de voir des SN Ia de très loin. Ci dessous, des observations avec le Hubble Space Telescope.



Supernova Ia

Le spectre des SN Ia possède une phase opaque et une phase nébulaire.

Dans la phase nébulaire, les raies du fer dominant.

Supernova Ia

Pourquoi n'observe-t-on pas d'hydrogène dans les spectres des NS Ia ?

Parce qu'il n'y en a pas dans les naines blanches qui sont à l'origine de l'explosion (proportion de 10^{-4} M dans les NB de type DA).

Pourquoi le fer domine-t-il dans la phase nébulaire ?

Il y en a très peu dans la naine blanche. Mais les réactions thermonucléaires lors de l'explosion en ont produit beaucoup.

Supernova Ia

En fait, le fer n'est pas produit directement :

le produit principal est le nickel (56) dans les couches internes (représentant 70% de la masse de la NB).

Le ^{56}Ni est instable et se transforme en ^{56}Co (période 6 jours).

En 6 jours, la moitié du ^{56}Ni est devenue du ^{56}Co .

Puis le Co se transforme en ^{56}Fe qui est stable. Période : 77 jours).

Supernova Ia

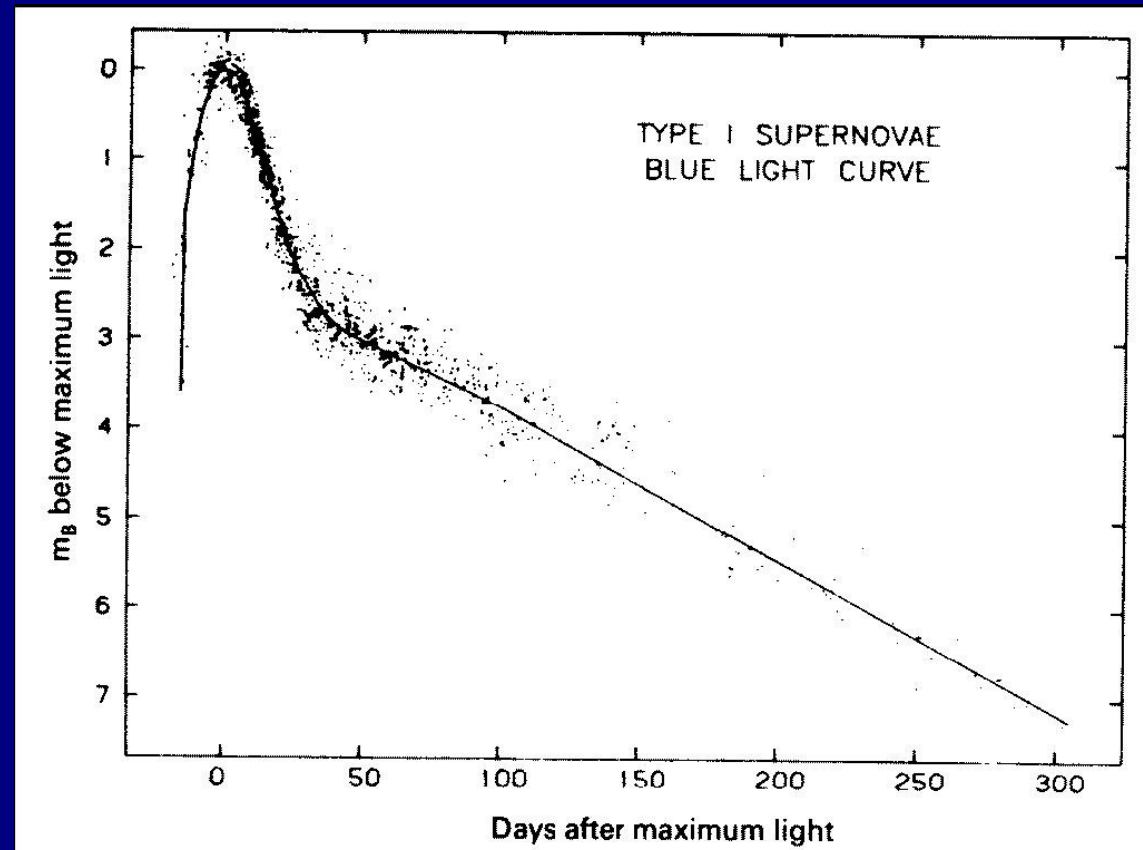
Le ^{56}Ni est instable et se transforme en ^{56}Co (période 6 jours).

En 6 jours, la moitié du ^{56}Ni est devenue du ^{56}Co .

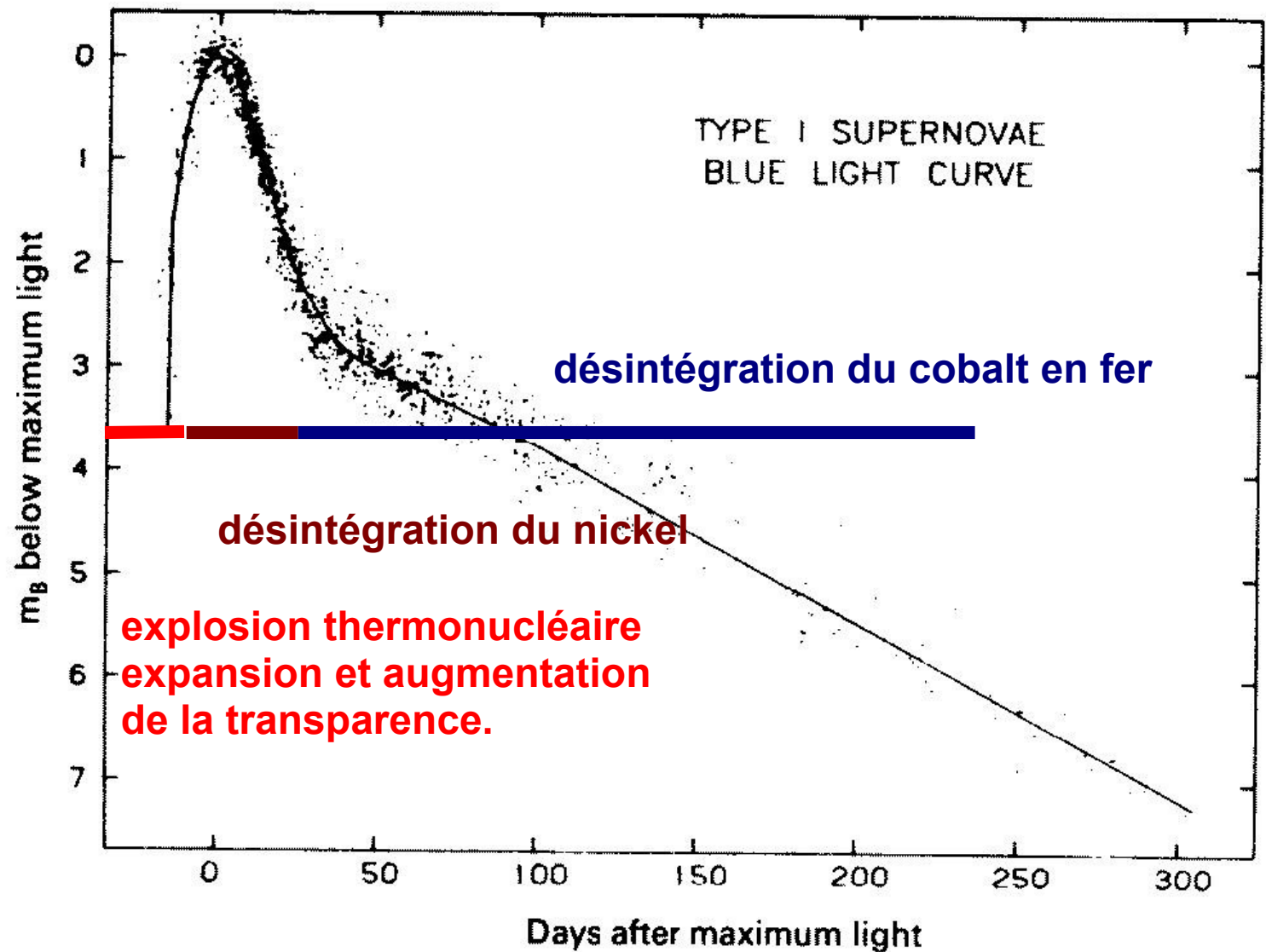
Puis le Co se transforme en ^{56}Fe qui est stable. Période : 77 jours).

Ces désintégrations radioactives produisent aussi des rayons gamma et sont la principale source de rayonnement des SN Ia.

C'est ainsi qu'on explique la courbe de luminosité des SN Ia.



Supernova Ia



Supernova Ia, ce qu'il en reste...

L'énergie de liaison gravitationnelle d'une étoile : au maximum (gaz de Fermi non relativiste), elle vaut

$E_{\text{liaison}} = 2 \cdot 10^{43}$ Joules.

C'est moins que l'énergie thermonucléaire libérée au cours de l'explosion.

Donc l'explosion d'une SN Ia peut disperser totalement l'étoile dans l'espace.

Similitude des spectres des supernovae Ia.

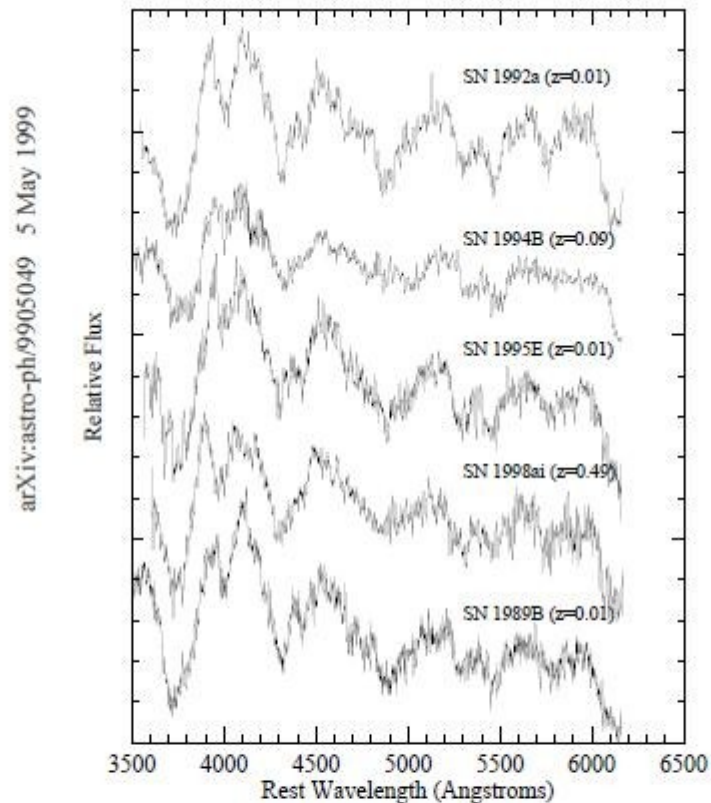


FIG. 3.13 – Comparaison des spectres de SN Ia à différents redshifts : le spectre de SN 1998ai, à distance cosmologique ($z = 0.49$), est comparé avec celui de SN Ia proches ($z = 0.01$). Tous ces spectres correspondent au cinquième jour après le maximum de luminosité. Le spectre de SN 1998ai a été obtenu avec le télescope Keck. La qualité des spectres des supernovæ proches a été volontairement dégradée pour faciliter la comparaison. Le spectre de SN 1994B ($z = 0.09$) est celui qui diffère le plus des autres et donne une idée de la dispersion des spectres de SN Ia [d'après Filippenko & Riess (2000)].

Supernova Ia, idée forte

Puisque toutes les SN Ia explosent de la même manière (ce qui est confirmé par leurs spectres), elles ont aussi la même luminosité.

Elles peuvent donc servir de chandelles standard.

Et comme on les voit de très loin, elles peuvent aider à déterminer la distance des galaxies lointaines, autrement que grâce à leur redshift.

Campagnes d'observations de SN Ia « cosmologiques » :
Supernova Cosmology Project [Perlmutter et al. 1999] et
High-Z Supernova Search Team [Riess et al. 1998] avec le HST et le Keck.



Supernovae Ia et cosmologie

Puisque toutes les SN Ia explosent de la même manière (ce qui est confirmé par leurs spectres), elles ont aussi la même luminosité.

Elles peuvent donc servir de chandelles standard.

Et comme on les voit de très loin, elles peuvent aider à déterminer la distance des galaxies lointaines, autrement que grâce à leur redshift.

Campagnes d'observations de SN Ia « cosmologiques » :
Supernova Cosmology Project [Perlmutter et al. 1999] et
High-Z Supernova Search Team [Riess et al. 1998] avec le HST et le Keck.

Conclusion : les SN Ia ont un éclat apparent plus faible qu'attendu dans un univers à constante cosmologique nulle.

Causes possibles : constante cosmologique non nulle, énergie noire...
ou obscurcissement provoqué par de la poussière
ou naines blanches C-O dans l'univers lointain/primordial différentes des
naines blanches dans l'univers actuel (évolution de la composition
chimique des étoiles par exemple).

(retour en arrière)

Comment évolue une naine blanche ?

... la vie d'une naine blanche est assez morne.

A moins qu'elle ait une compagne :

variables cataclysmiques

spectacle garanti, répétitions fréquentes,
sous-familles (novae naines etc) suivant la nature de l'étoile compagnon.
dissémination partielle de matière stellaire (enrichie) dans le milieu interstellaire.

supernovae Ia

grand spectacle, représentation unique
mais d'une étoile à l'autre, c'est un peu toujours la même chose.

dissémination complète de la matière stellaire (très enrichie en éléments lourds)
dans le milieu interstellaire, prête pour le recyclage en étoiles et planètes.

Les supernovae Ia et les autres

SN Ia, thermonucléaires :

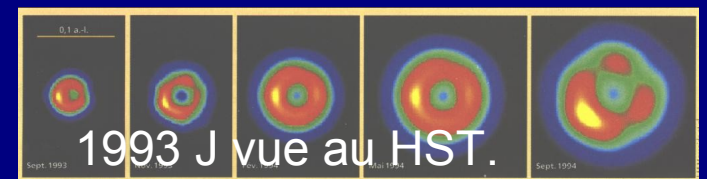
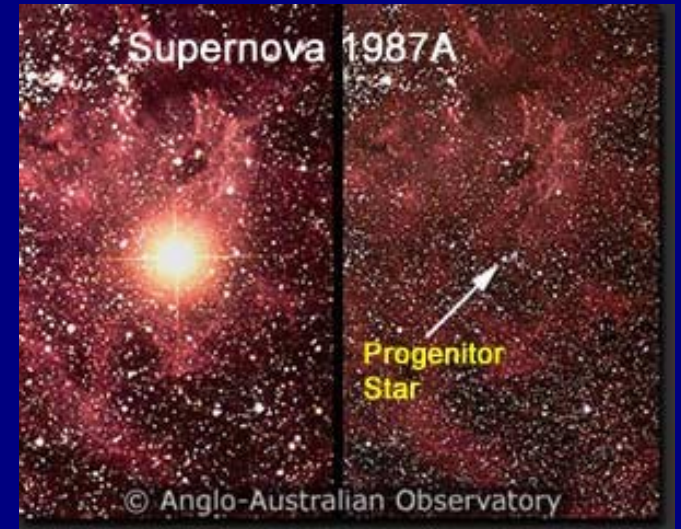
- explosion complète d'une naine blanche dans un système binaire.
- L'explosion est due à la réactivation/l'emballement de réactions thermonucléaires à partir du carbone.
- Ont toutes la même luminosité
- Brillent beaucoup. $E = 10^{44}$ J.
- L'énergie est surtout dispersée sous forme lumineuse, notamment lors de la désintégration du nickel et du cobalt.

SN gravitationnelles :

- effondrement d'une étoile géante massive ($< 8 M_{\odot}$) en étoile à neutrons ou trou noir.
- L'explosion est due à un effondrement gravitationnel, provoquant la dissociation du fer et des captures d'électrons.
- N'ont pas toutes la même luminosité
- Emettent encore plus d'énergie. $E \sim 10^{46}$ J, mais moins sous forme électromagnétique (1%).
- L'énergie est surtout dispersée sous forme de neutrinos (99%).

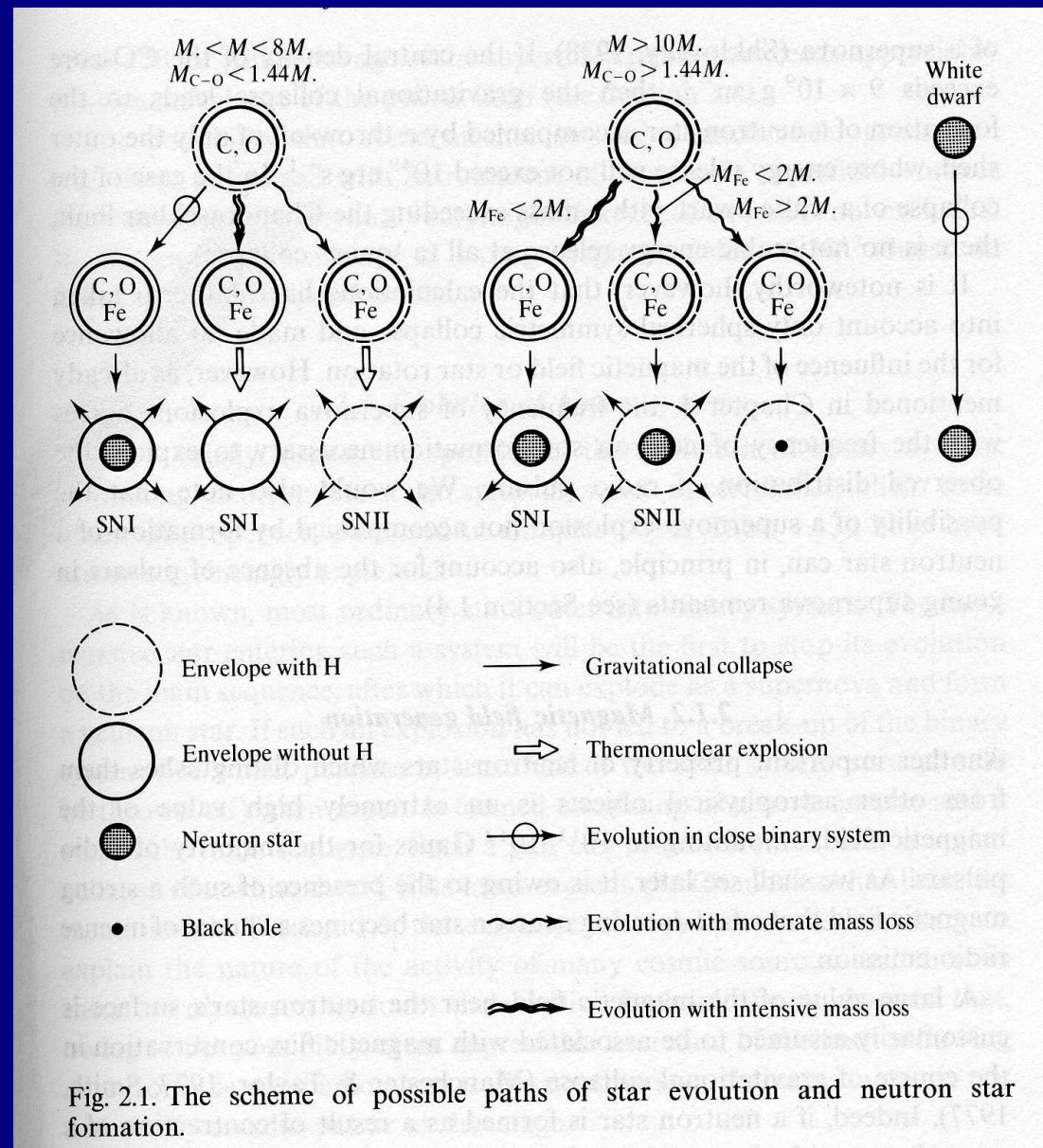
Retour sur les supernovae évoquées

D'après ce que j'ai trouvé, les SN historiques hébergent toutes une étoile à neutrons ou un trou noir. C'étaient donc des SN gravitationnelles.



Retour sur les scénarios de formation d'astres très compact ou destruction

[magnetospheres of pulsars, Istomin et al.]



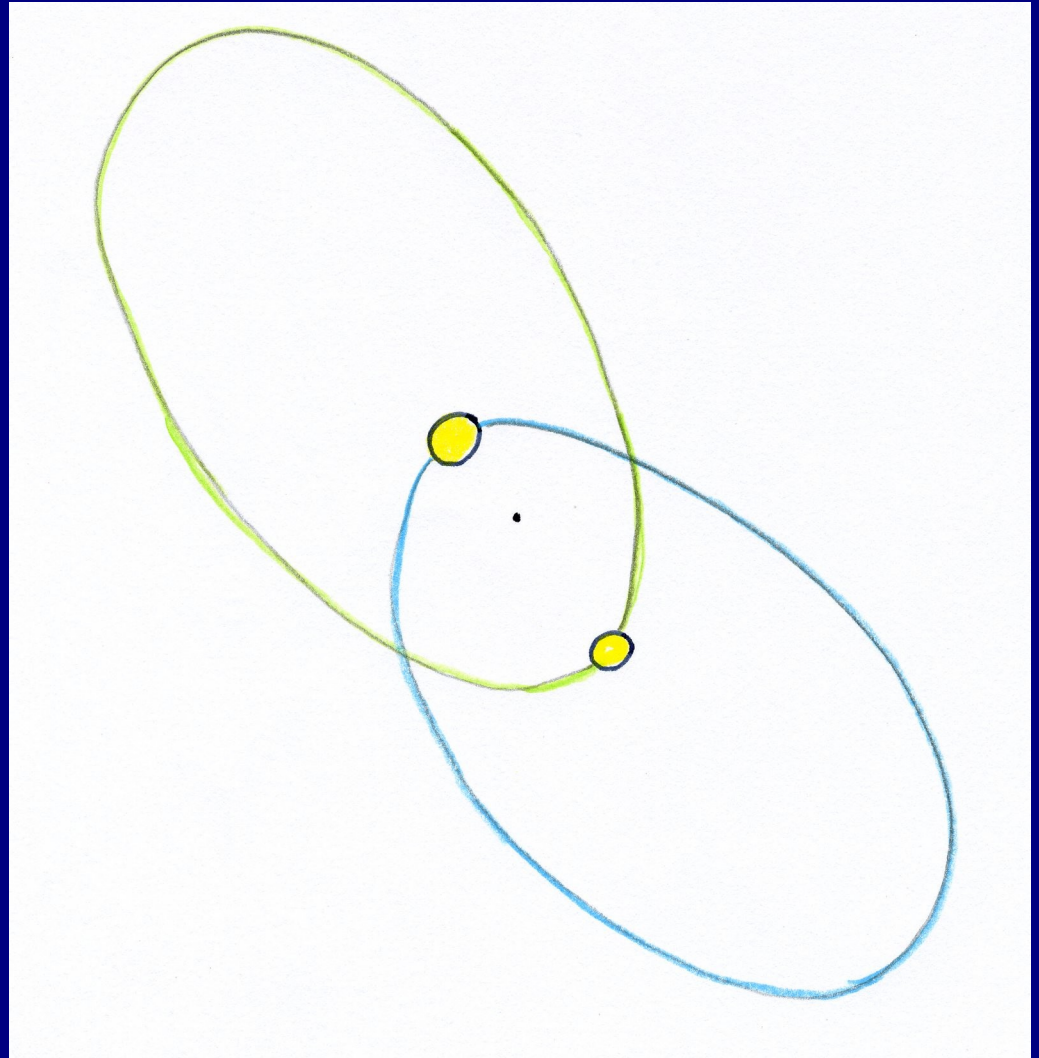
Binaires proches et gravitation

Le diagramme de Roche est bien beau mais il est newtonien.

- Or une étoile compacte est relativiste (même un naine blanche l'est un peu)

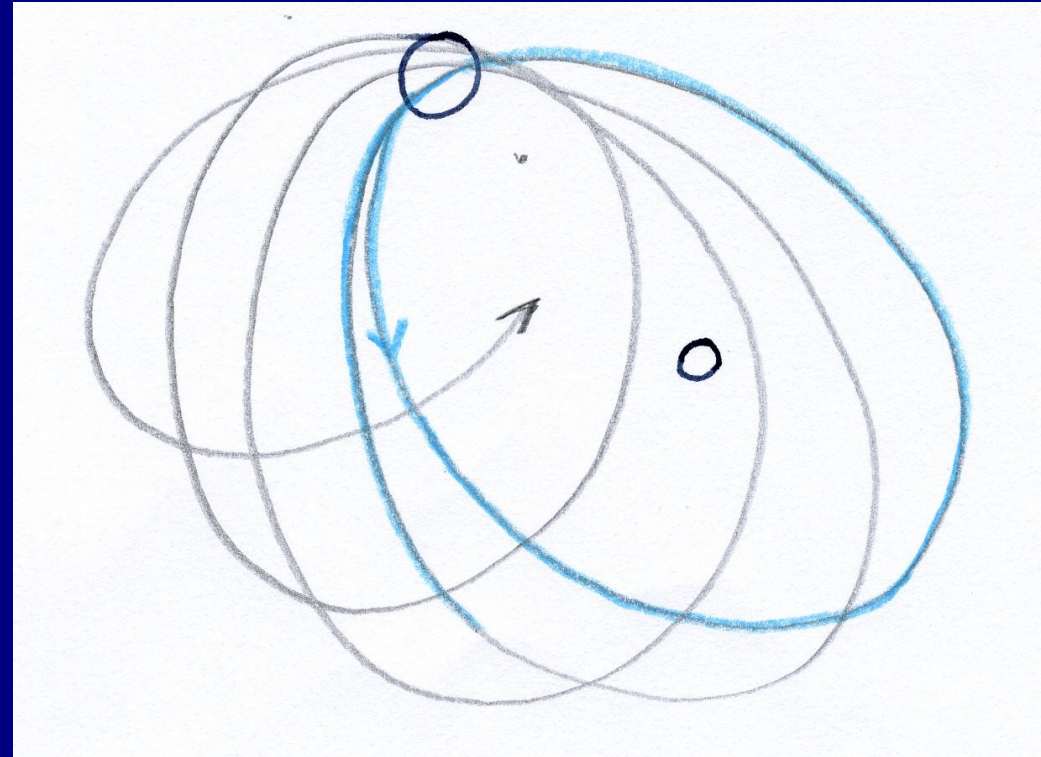
Deux corps en gravitation relativiste

L'orbite n'est plus formée de deux ellipses immuables, mais, dans le cas faiblement relativiste, de deux ellipses se déformant lentement.



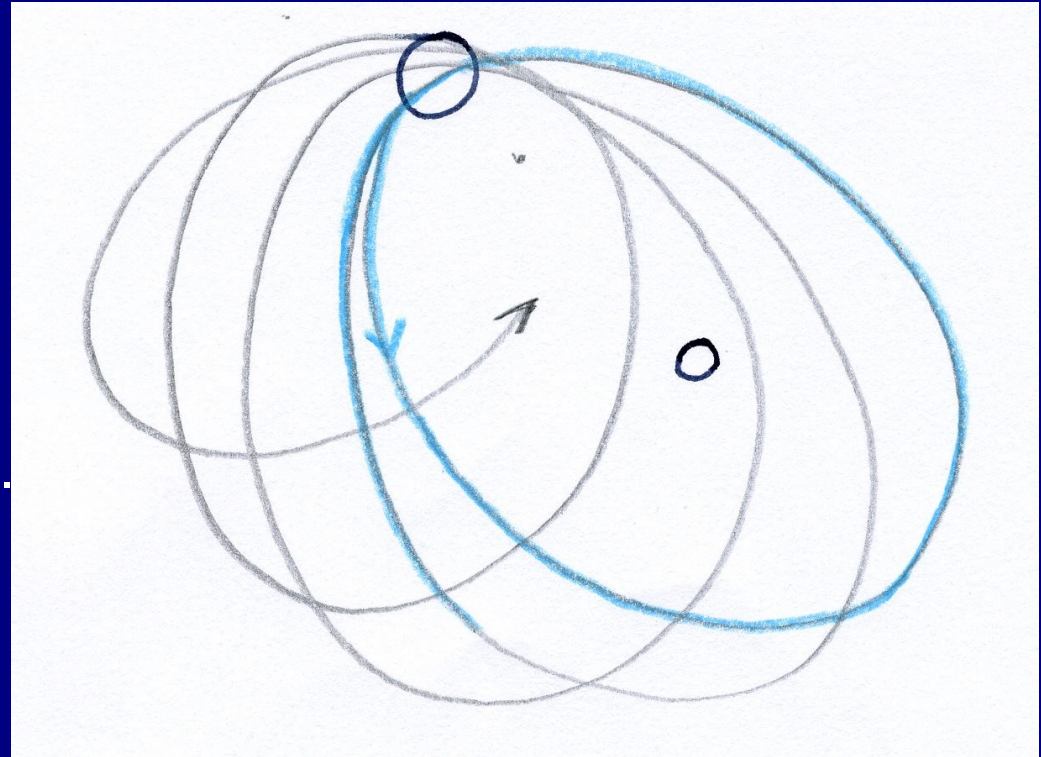
Deux corps en gravitation relativiste

- La position du périastre (point le plus proche du centre de masse) tourne lentement.
- Le grand axe de l'ellipse (sa longueur) diminue.



Le grand axe diminue

- Cela correspond à une perte d'énergie gravitationnelle.
- Cette énergie est rayonnée dans l'espace sous forme d'ondes gravitationnelles.
- Ces ondes propagent une déformation de l'espace et du temps.
- C'est une particularité de la relativité générale.
- Bien que prédites dans les années 1920, on n'a pas mesuré directement ces ondes en 2007.
- Les preuves observationnelles indirectes sont très récentes... et dues aux astres compacts.



Binaires proches et gravitation

Le diagramme de Roche est bien beau mais il est newtonien.

- Or une étoile compacte est relativiste (même un naine blanche l'est un peu)
- Les orbites ne sont donc pas des cercles ou des ellipses.
- Un couple d'étoiles proches, surtout avec une compacte, rayonne des ondes gravitationnelles.
- Ce sont des affirmations fondées sur des calculs théoriques en RG.
- Est-on bien sûr de la RG ? Peut-on prouver expérimentalement l'existence de telles orbites ?

Des preuves de la relativité générale

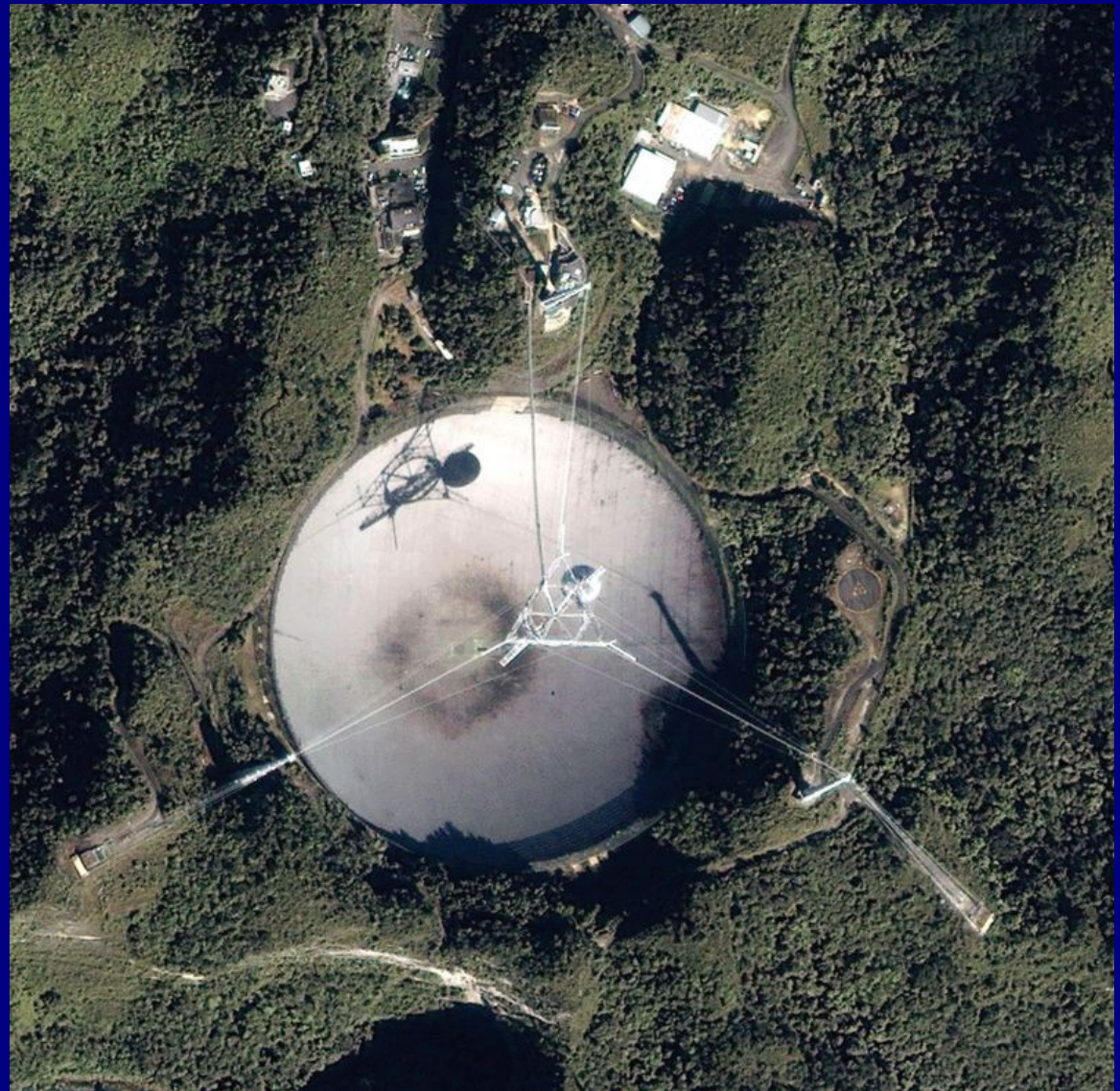
- La précession de l'orbite de Mercure était connue avant les travaux d'Einstein. La RG a été la première théorie à l'expliquer.
- D'autres théories de la gravitation permettent aussi d'expliquer la précession des orbites.
- Seule la théorie d'Einstein prédit l'existence d'ondes gravitationnelles.
- Mais ces ondes ont une très faible intensité. Dans le cas du système solaire, ou des étoiles ordinaires, l'effet est si faible qu'il n'est pas mesurable.

Le pulsar double PSR 1913+16. Une horloge très précise.

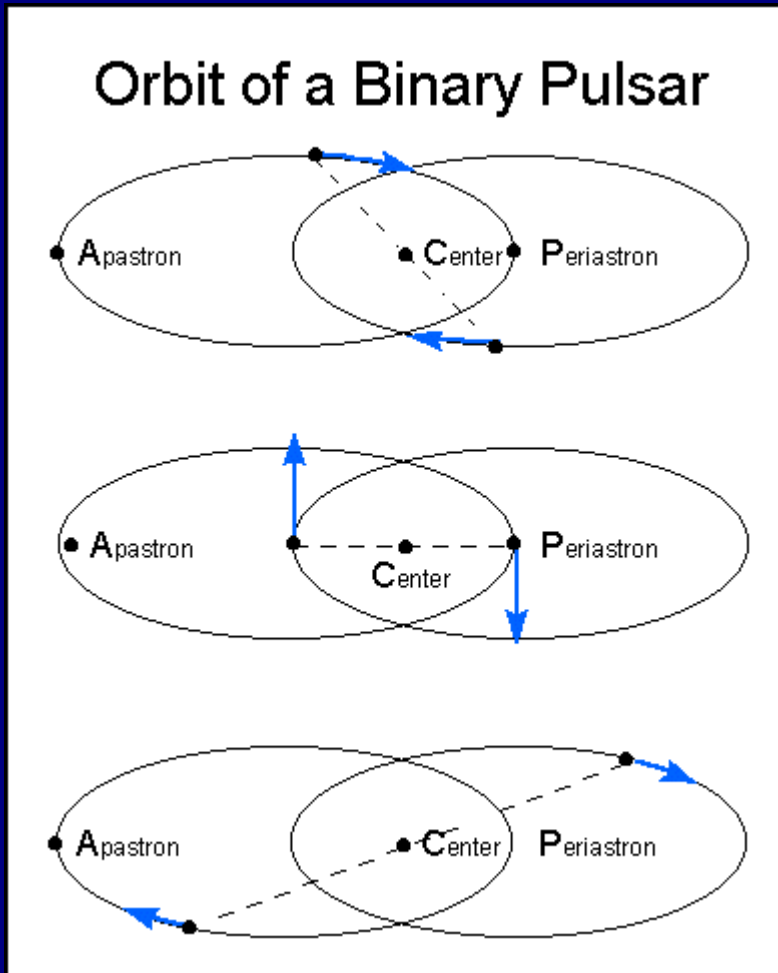
Arecibo, 1974 : Hulse et Taylor découvrent un nouveau PSR.

$P = 59$ millisecondes (17 tours par seconde), avec des variations modulées sur une durée de 7,75 heures.

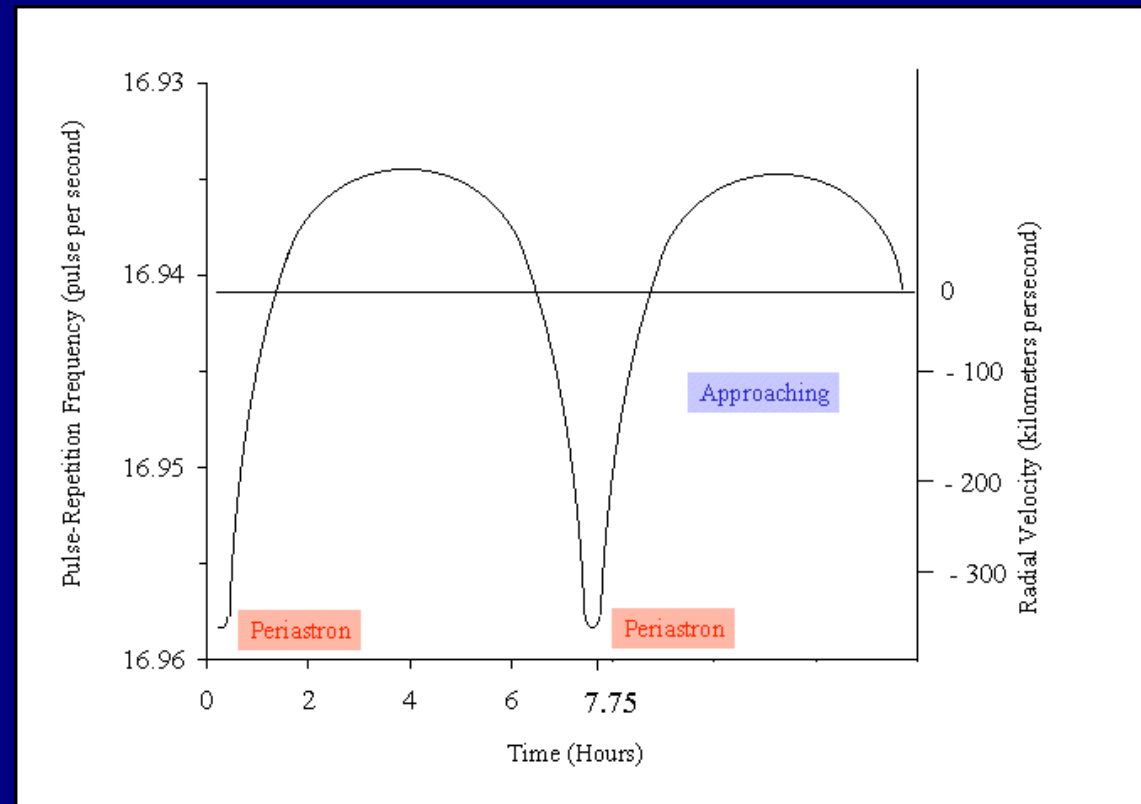
A part ces modulations, la période est très stable, ce qui permet de considérer ce PSR comme une horloge très précise.



Le pulsar double PSR 1913+16. Une horloge en orbite.

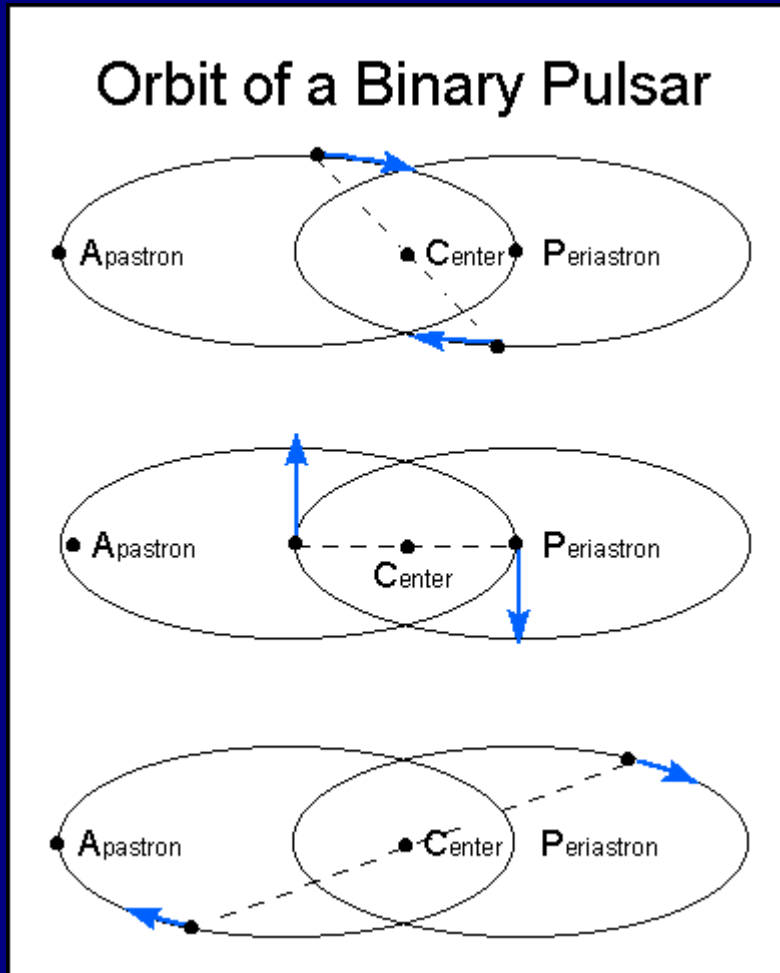


Deux astres de 1,4 masse solaire,
périastre : 1,1 rayon solaire (300km/s),
apoastre : 4,8 rayons solaires (75 km/s).
[Univ Cornell, d'après Weisberg *et al.* 1981]

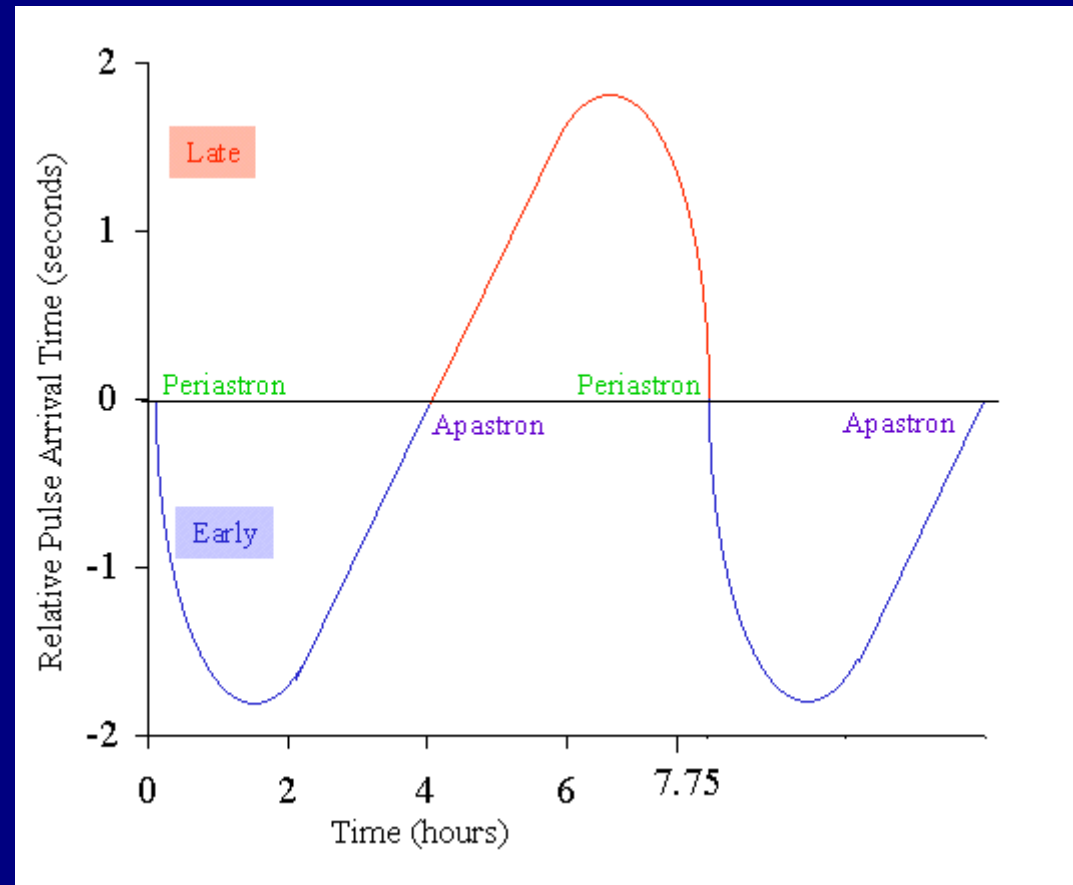


Vitesse d'un astre, le long de la ligne
de visée de l'observateur déduite de la freq. de
répétition des impulsions.
Asymétrie : marque de l'ellipticité de l'orbite.
Dimension : 3 secondes lumière (1 million km).
[Univ Cornell, d'après Weisberg *et al.* 1981]

Le pulsar double PSR 1913+16. Une horloge en orbite.



Deux astres de 1,4 masse solaire,
périastre : 1,1 rayon solaire (300km/s),
apoastre : 4,8 rayons solaires (75 km/s).
[Univ Cornell, d'après Weisberg *et al.* 1981]



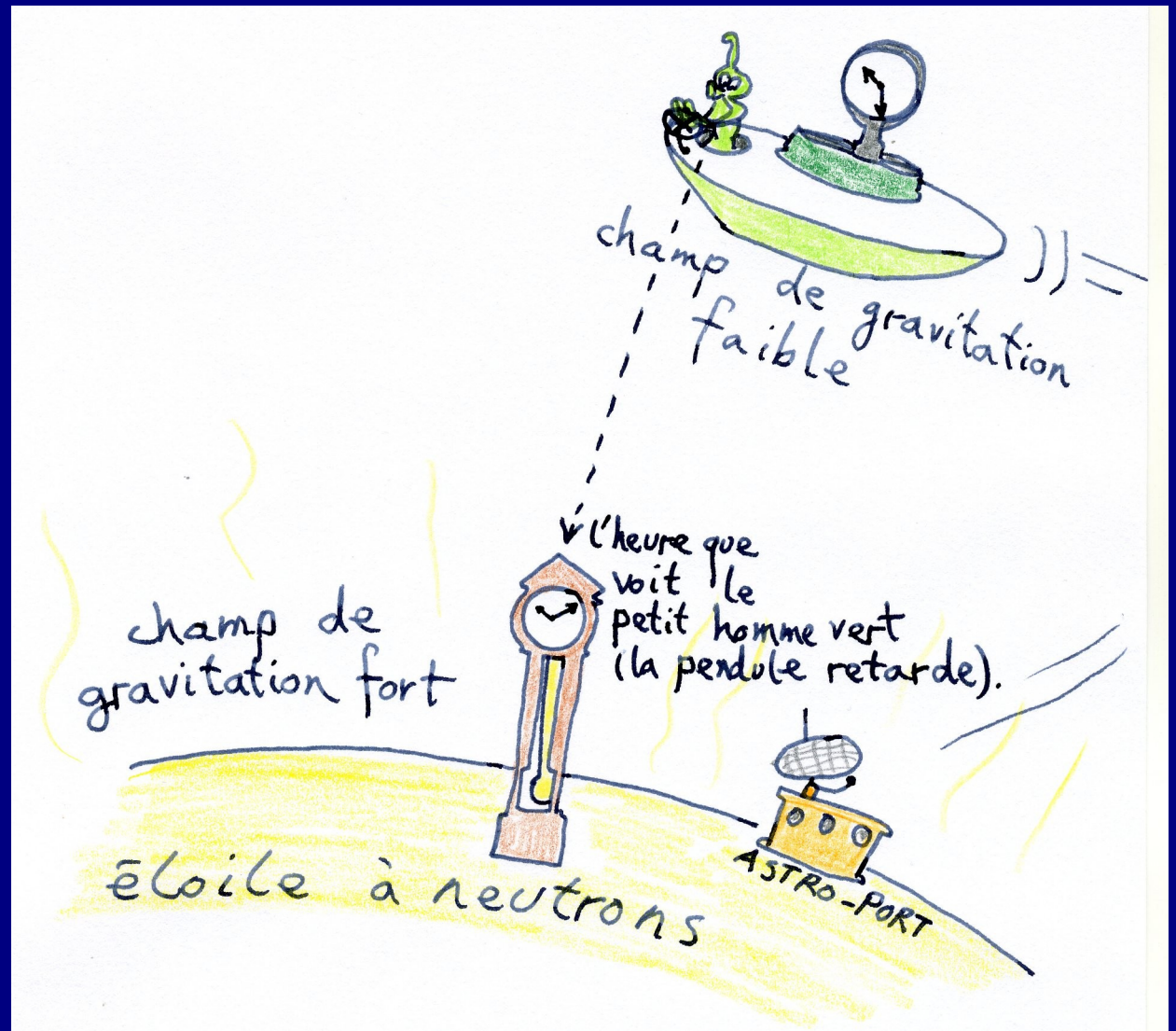
Les décalage temporels par rapport à des impulsions qui arriveraient régulièrement.

[Univ Cornell, d'après Weisberg *et al.* 1981]

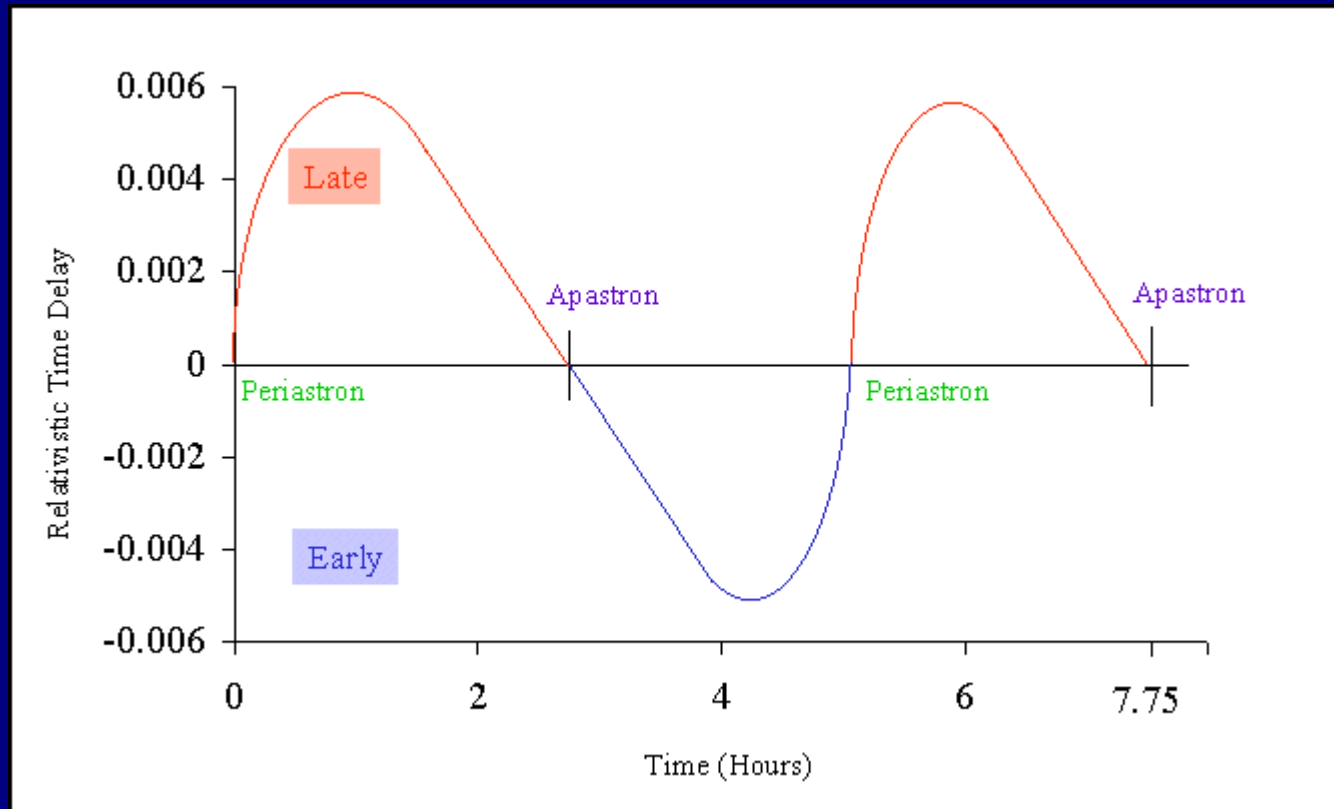
Le pulsar double PSR 1913+16 : une horloge en orbite.

Hulse et Taylor (histoire d'un prix Nobel) :

Si l'orbite est relativiste, les délais de l'impulsion doivent avoir également une origine gravitationnelle.



Le pulsar double PSR 1913+16 : une horloge en orbite.



Délai d'arrivée des impulsions, une fois retiré ce qui serait dû à une orbite circulaire.

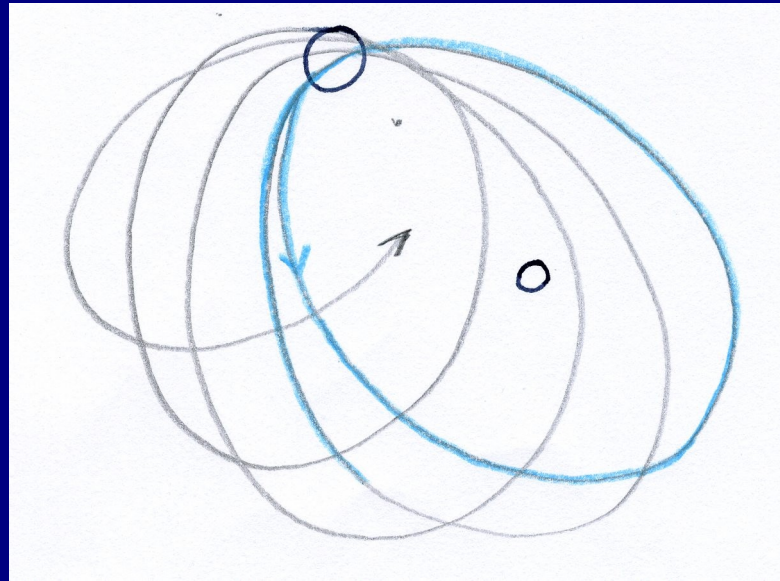
0) l'orbite n'est pas circulaire (on le savait déjà)

1) quand la source est rapide, le temps nous paraît dilaté (délai augmente)

2) quand les deux astres sont proches, redshift gravitationnel.

[Univ Cornell, d'après Weisberg *et al.* 1981]

Le pulsar double PSR 1913+16 : une horloge en orbite.



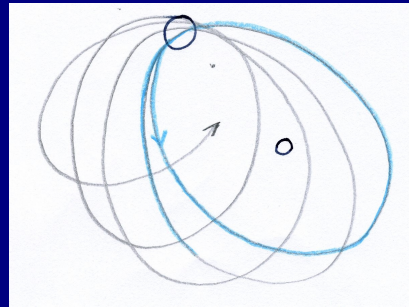
Si les orbites étaient newtoniennes/keplériennes,
leurs éléments ne changeraient pas.

Ici, on observe une évolution.

Le périastre se déplace de 4,5 degrés par an (précession du périastre).

La mesure de la précession et des paramètres keplériens permet de connaître
la somme des masses des deux étoiles.

Le pulsar double PSR 1913+16 : une horloge en orbite.



Si les orbites étaient newtonniennes/keplériennes, leurs éléments ne changeraient pas.

Ici, on observe une évolution.

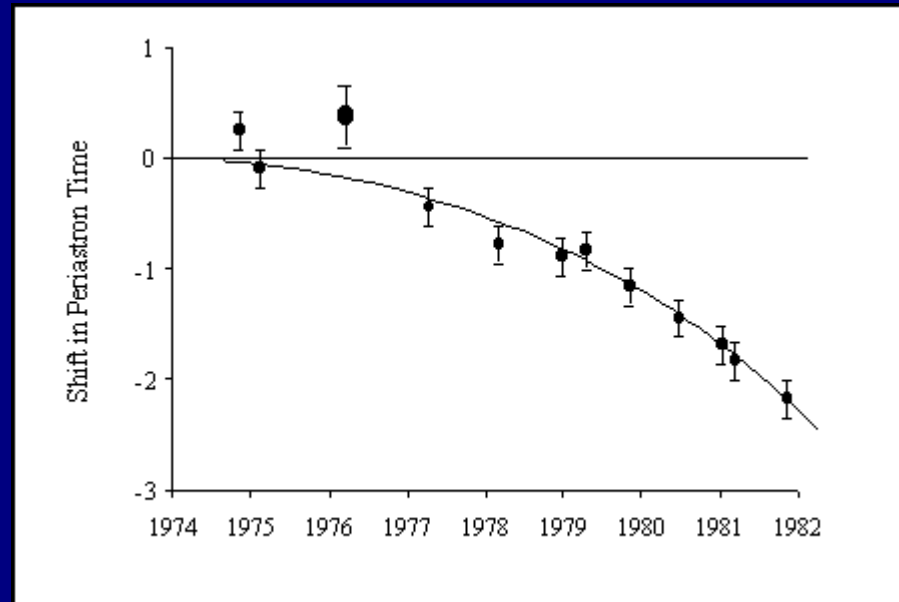
Le périastre se déplace de 4,5 degrés par an (précession du périastre).

La mesure de la précession et des paramètres keplériens permet de connaître la somme des masses des deux étoiles.

La mesure du Doppler transverse (relativiste) et du redshift gravitationnel permettent de **déduire chacune des masses**.

La variation des autres paramètres permet de **tester la théorie de la relativité générale**.

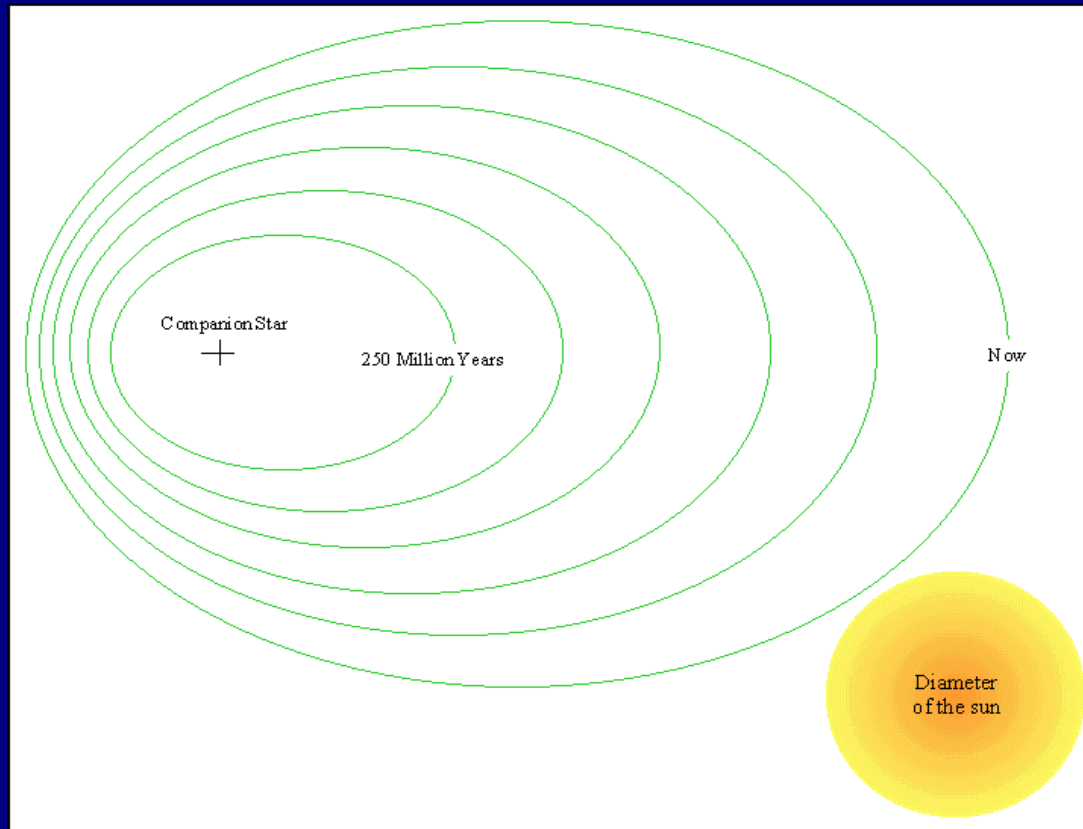
Le pulsar double PSR 1913+16 : une horloge en orbite prouve l'existence des ondes gravitationnelles.



La variation des autres paramètres permet de **tester la théorie de la relativité générale**.

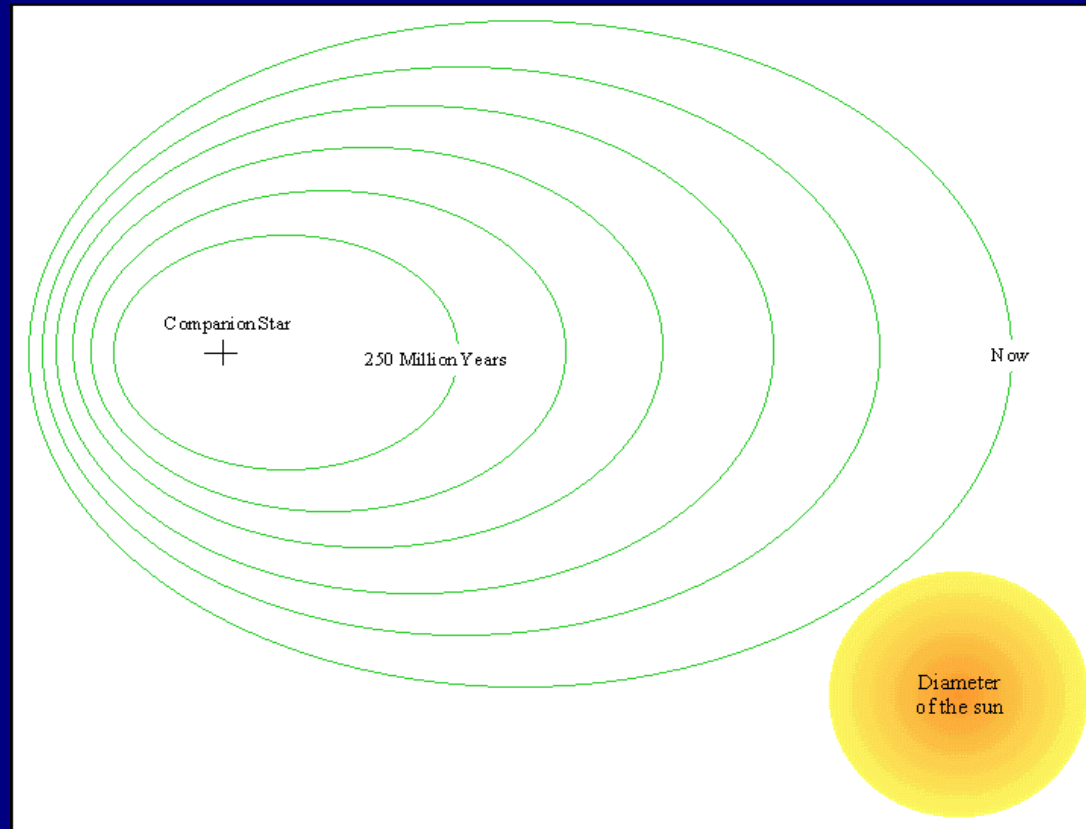
Le temps de passage au périastre se décale et une analyse prouve que les deux astres se rapprochent. Le système des deux astres perd donc de l'énergie gravitationnelle. Le théorie de la RG prévoit que cette énergie serait perdue à cause du rayonnement d'**ondes gravitationnelles**.

Le pulsar double PSR 1913+16



Cette perte d'énergie est comparée aux prédictions théorique.
Première annonce d'Hulse et Taylor en 1978 (4 ans après la découverte du PSR).
Depuis, accord de 0,5% en perte d'énergie, entre leurs observations et la théorie des ondes gravitationnelles.
Prix Nobel en 1993, pour la première démonstration expérimentale des ondes gravitationnelles.
[Univ Cornell, d'après Weisberg *et al.* 1981]

Le pulsar double PSR 1913+16



Actuellement, les deux étoiles se rapprochent de 3 mm par orbite.
Les deux étoiles devraient entrer en collision d'ici 300 millions d'années.

[Univ Cornell, d'après Weisberg *et al.* 1981]

Les masses des pulsars binaires

Masses mesurées dans les pulsars binaires

PSR	P_{pulsar} [ms]	P_{orb} [h]	$a \sin i$ [km]	M_{pulsar} [$M_{\odot}$]	$M_{\text{compagnon}}$ [$M_{\odot}$]	Ref.
B1913+16	59	7 h 45 min	$7.0 \cdot 10^5$	1.4408 (3)	1.3873 (3)	[1]
B1534+12	38	10 h 05 min	$1.2 \cdot 10^6$	1.3332 (10)	1.3452 (10)	[2]
B2127+11C	31	8 h 09 min	$7.6 \cdot 10^5$	1.344 (23)	1.374 (23)	[3]
J0737-3039	23; 2773	2 h 27 min	$4.2 \cdot 10^5$	1.337(5)	1.250 (5)	[4]
J1141-6545	393	4 h 44 min	$5.6 \cdot 10^5$	1.30 (2)	0.986 (20)	[5]
B1855+09	5.4	12.3 j	$2.8 \cdot 10^6$	1.503 (15)	0.262 (2)	
J1713+0747	4.6	68 j	$9.7 \cdot 10^6$	1.32 (5)	0.22 (2)	

[1] Weisberg & Taylor 2003, [2] Stairs et al. 2002, [3] dans M 15, [4] Lyne et al. 2004, [5] Bailes et al. 2003

Grâce aux effets relativistes, les masses des deux étoiles à neutrons de PSR 1913+16 sont les masses d'étoiles les mieux connues après le Soleil.

[Eric Gourgoulhon, Mercredis de l'Observatoire]