Festival d'Astronomie de Fleurance – Cycle d'approfondissement « fil rouge »
Jeudi 11 août 14h30-16h30

Caractérisation du microquasar GRS 1915+105

Frédéric Daigne
(Institut d'Astrophysique de Paris ; Université Pierre et Marie Curie)

Les transparents montrés pendant l'atelier seront disponibles pendant quelques semaines à partir du lien suivant :
https://www.dropbox.com/s/zkupyva1fnzg38t/Fleurance2016-FDaigne-AtelierMicroquasar.pdf?dl=0

Données numériques

Masse du Soleil	$M_\odot = 2.0\ 10^{30}$ kg	Unité astronomique	1 au = $1.5\ 10^{11}$ m
Rayon du Soleil	$R_\odot = 7.0\ 10^{5}$ km	Parsec	1 pc = $3.1\ 10^{16}$ m
Luminosité du Soleil	$L_\odot = 3.9\ 10^{26}$ W	Constante de Newton	$G = 6.7\ 10^{-11}$ S.I.
Vitesse de la lumière	$c = 3.0\ 10^{5}$ km/s	Masse du proton	$m_p = 1.7\ 10^{-27}$ kg
Jour	1 jour = 86400 s	Section efficace Thomson	$\sigma_T = 6.7\ 10^{-29}$ m^2

Rappel : dans un cercle, il y a 360°, dans un degré il y a 60' (minutes d'arc) et dans une minute d'arc il y a 60" (secondes d'arc). Donc 1° = 3600".

Introduction – GRS 1915+105 : une binaire X

■ <u>QUESTION 1:</u> masse minimum de GRS 1915+105 dans l'hypothèse « étoile normale »
Quelle masse minimum est donnée par la limite d'Eddington ?

- la luminosité de GRS 1915+105 est $L = 2\ 10^6\ L_\odot$
- la limite d'Eddington est donnée par $$L < L_{\rm Edd} = \frac{4\pi G M m_{\rm p} c}{\sigma_{\rm T}} = 3.4\times 10^4 \left(\frac{M}{M_\odot}\right) L_\odot$$

Réponse : M > (l'unité adaptée est la masse solaire)

Question facultative : sauriez-vous retrouver l'origine de la limite d'Eddington ?
La force exercée par le rayonnement de l'étoile sur un petit élément de masse m à sa surface vaut : $\vec{f}_{\rm rad} = \frac{L\sigma_{\rm T}\, m}{4\pi r^2 c\, m_{\rm p}}\vec{u}_r$

■ <u>QUESTION 2:</u> rayon maximum de GRS 1915+105 obtenu à partir de la variabilité observée

- la plus petite échelle de temps de variabilité observée est de l'ordre de Δt_{var} = 100 ms
- la limite de causalité est donnée par $R < c\ \Delta t_{var}$

Réponse : R < (une unité adaptée est le km ou le rayon solaire)

■ <u>QUESTION 3:</u> quelle est la plus petite échelle de temps de variabilité attendue pour un trou noir de 100 masses solaires ? (même question pour 1 et 10 masses solaires)

- prendre comme rayon caractéristique celui de la dernière orbite stable autour d'un trou noir :

$$R_{\rm ms} = 6\frac{GM}{c^2} = 9\left(\frac{M}{1\,M_\odot}\right)\ {\rm km}$$

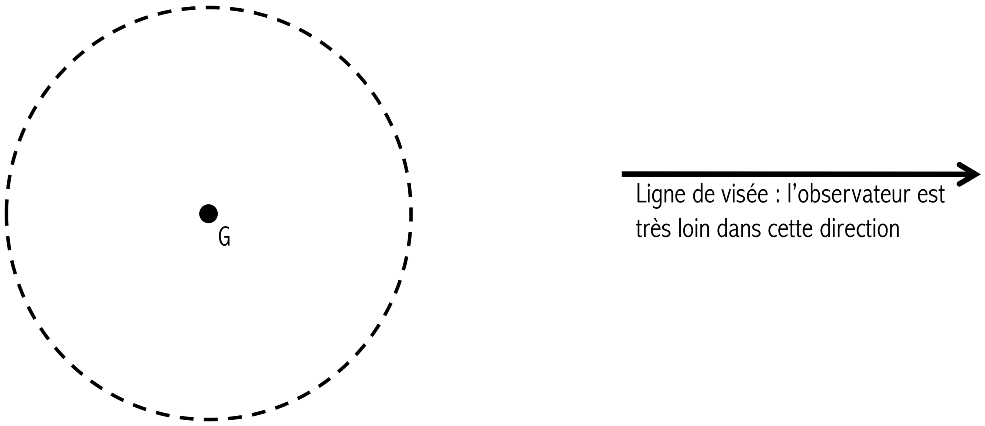
Réponse : Δt_{var} = (une unité adaptée est la seconde ou la milliseconde)

L'astre central : mesurer sa masse, déterminer sa nature

Etape n°1 : vitesse du compagnon

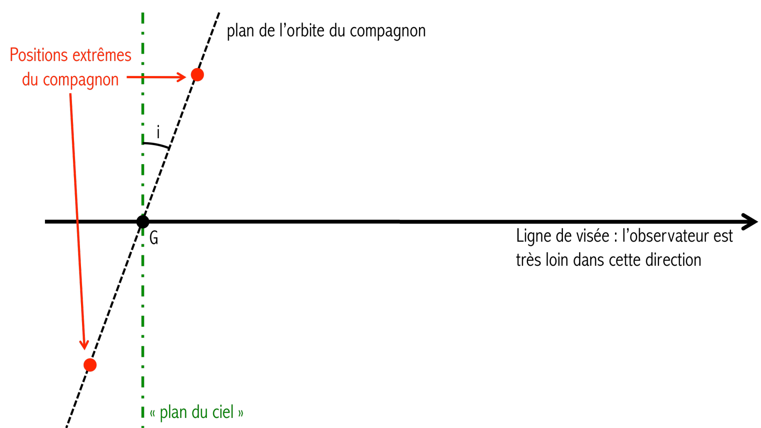
■ QUESTION 4: effet Doppler. Au cours de l'orbite du compagnon, quelles sont les valeurs extrêmes de la vitesse projetée mesurée par effet Doppler ? Placer les positions correspondantes sur le schéma. Comment déterminer la vraie vitesse v_2 du compagnon ?

Réponses : - valeurs extrêmes de la vitesse projetée :
- positions correspondantes sur le schéma :



- principe de mesure de v_2 :

■ QUESTION 5: correction pour l'angle d'inclinaison. L'angle d'inclinaison i est défini sur le schéma ci-dessous. Pour quelle valeur de i mesure-t-on la vitesse projetée la plus petite ? la plus grande ? Dans le cas général, quelle combinaison de v_2 et i peut-on mesurer par effet Doppler ? On note cette combinaison K_2.



Réponses : - angle i donnant la vitesse projetée la plus petite :
- angle i donnant la vitesse projetée la plus grande :

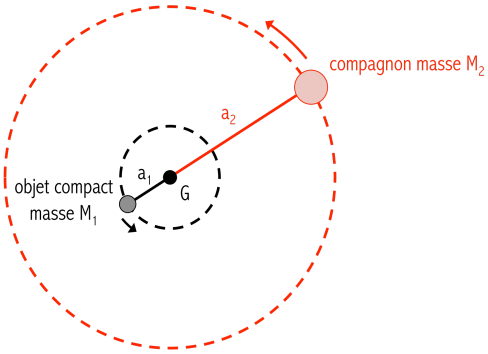
- K_2 =

■ QUESTION 6: mesure de K_2. A partir de ce qui précède, mesurer K_2 sur le « phasogramme » du compagnon de GRS 1915+105 donné Figure 1.

Réponse : K_2 = (une unité adaptée est le km/s)

Etape n°2 : mesure de la masse

Schéma général :



Plan orbital vu de dessus – La période orbitale est P

3ème loi de Kepler :

$$\frac{P^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G\,(M_1 + M_2)}$$

Relation entre les rayons :

$$a = a_1 + a_2$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{M_2}{M_1}$$

■ <u>QUESTION 7:</u> on suppose l'orbite du compagnon circulaire. Donner l'expression de sa vitesse v_2 en fonction de la période orbitale P et du rayon a_2 de l'orbite.

Réponse : v_2 =

■ <u>QUESTION 8:</u> reformuler la loi de Kepler en ne faisant plus apparaître que P, M_1, M_2 et v_2.

Réponse :

■ <u>QUESTION 9:</u> réorganiser l'équation précédente pour la mettre sous la forme « combinaison des masses M_1 et M_2 en fonction de P et v_2 », c'est à dire « ce que l'on cherche en fonction de ce que l'on sait mesurer ».

Réponse :

■ <u>QUESTION 10:</u> réécrire l'expression précédente en faisant apparaître la vraie quantité mesurée, K_2, au lieu de la vitesse v_2.

Réponse :

(la combinaison de M_1, M_2 et sin(i) qui apparaît s'appelle la « fonction de masse », notée f)

■ <u>QUESTION 11:</u> calculer la valeur de la fonction de masse de GRS 1915+105 à partir des quantités mesurées.

- la période orbitale vaut P = 33.5 jours
- K_2 a été mesuré à la question 6

Réponse : f = (une unité adaptée est la masse du Soleil)

■ QUESTION 12: montrer que la masse M_1 de l'objet central est toujours supérieure ou égale à la fonction de masse f. Conclure pour la nature de l'objet central (étoile à neutrons/trou noir).

- indice : écrire l'expression f/M_1 comme le produit de deux termes plus petits que 1.
- une étoile à neutrons ne peut pas être plus massive que ~2-3 masses solaires.

Réponse et conclusion :

Ejection par l'astre central: mesurer la vitesse de l'éjecta

Etape n°1 : vitesses apparentes des deux éjectas

■ QUESTION 13: sur la figure 2, mesurer la vitesse angulaire apparente des deux éjectas (en secondes d'arc par jour).

- l'échelle est donnée en bas de la figure.
- à quoi voit-on que la vitesse est uniforme ?

Réponse : $\omega_1 =$

$\omega_2 =$

■ QUESTION 14: déduire du résultat précédent la vitesse des deux éjectas en km/s.

- la distance de GRS 1915+105 est D = 12 kpc
- une unité astronomique à une distance de 1 pc est vue sous une seconde d'arc.

Réponse : $v_1 =$

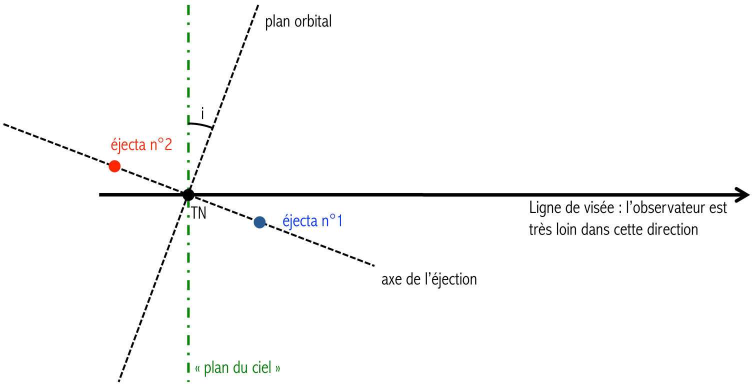
$v_2 =$

■ QUESTION 15: que remarquez-vous ?

Réponse :

Etape n°2 : interprétation et mesure de la vitesse vraie

Schéma général et hypothèses :



On suppose (1) que l'axe d'éjection est perpendiculaire au plan orbital ; (2) que les deux éjectas sont éjectés en même temps par la source centrale à t=0 avec la même vitesse v.

■ <u>QUESTION 16:</u> **quelle est la distance R(t) parcourue par chaque éjecta au bout d'un temps t ?**

Réponse : $R(t) =$

■ <u>QUESTION 17:</u> **quelle est le déplacement apparent sur le plan du ciel de chaque éjecta, en fonction de R(t) et i ?**

Réponse : $R_{ap}(t) =$

■ <u>QUESTION 18:</u> **chaque éjecta émet de la lumière à la date t. A quelle date les photons sont-ils reçus par l'observateur à la distance D (rappel : les photons voyagent à la vitesse c) ?**

Réponse : $t_1 =$ (éjecta n°1)

$t_2 =$ (éjecta n°2)

Question subsidiaire : que valent t_1 et t_2 si les éjectas émettent de la lumière lors de leur éjection à $t=0$?

■ <u>QUESTION 19:</u> **déduire de ce qui précède les expressions des vitesses apparentes de chaque éjecta en fonction de la vitesse vraie v et de l'angle d'inclinaison i.**

Réponse : $v_1 =$ (éjecta n°1)

$v_2 =$ (éjecta n°2)

Question facultative : étudier la fonction $v_1(i)$: pour quel angle i est-elle maximum ? Que vaut alors le maximum ? En déduire une condition sur v pour que le mouvement apparent soit supraluminique. Conclure qu'un mouvement apparent supraluminique implique un mouvement réel relativiste (v proche de c).

■ <u>QUESTION 20:</u> **le résultat de la question 19 correspond à un système de deux inconnues (v et i) en fonction de deux quantités mesurées (v_1 et v_2). Calculer v et i à partir des valeurs de v1 et v2 mesurées à la question 14.**

Réponse : $v =$ (donner le résultat en km/s et en unité de la vitesse de la lumière)

$i =$ (donner le résultat en degrés)

■ <u>QUESTION 21:</u> **à l'aide de la valeur de l'angle i obtenue à la question 20, de la fonction de masse obtenue à la question 11 et de la masse $M_2=1.2\ M_\odot$ du compagnon, déterminer la masse M_1 du « candidat trou noir » au centre de GRS 1915+105 (l'équation ne peut pas être résolue explicitement facilement. Le plus simple est de procéder par dichotomie avec une calculette).**

Réponse : $M_1 =$ (donner le résultat en masses solaires)

Figure 1 : phasogramme du compagnon de GRS 1915+105. La vitesse projetée est tracée en fonction de la phase (une période : la phase orbitale varie de 0 à 1).
(figure tirée de Greiner et al. 2001)

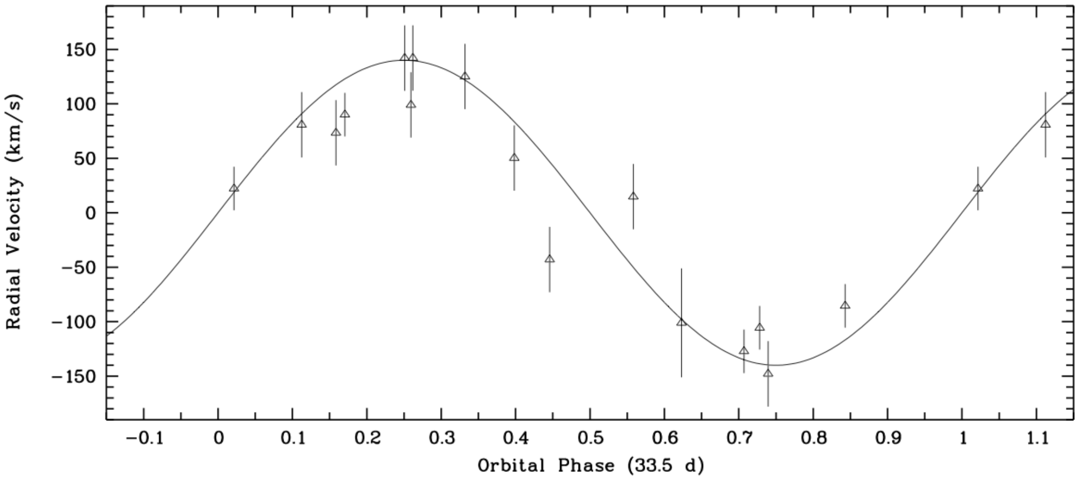


Figure 2 : observation radio d'une éjection relativiste par la source centrale (trou noir accrétant) de GRS 1915+105. L'échelle des distances apparentes (c'est à dire des distances angulaires, en secondes d'arc) est donnée en bas de la figure. Chaque image correspond à une date différente et la distance verticale entre deux images est proportionnelle à la durée entre les deux dates.
(figure adaptée de Rodriguez & Mirabel 1995)