*Noyaux galactiques actifs*

1.
 - a. À votre avis, comment a-t-on pu estimer la masse du trou noir supposé présent au centre de notre galaxie ? On répondra par analyse de l'annexe et en s'appuyant sur les résultats connus du cours.
 - b. La distance du noyau galactique à la Terre est de l'ordre de $1,6 \times 10^6$ UA. Quelle est la précision angulaire nécessaire pour estimer la dimension de SgrA* ? Quelle est la taille du radiotélescope nécessaire pour une telle mesure ? Commenter. La longueur d'onde explorée est $\lambda = 21$ cm.
2. On étudie un mobile ponctuel de masse m en orbite autour d'un astre A homogène et à symétrie sphérique, de masse M , de rayon R ; on note $\mathcal{G} = 6,67 \times 10^{-11}$ SI la constante de la gravitation universelle (ou constante de Cavendish).
 - a. Déterminer la *première vitesse cosmique* v_1 (vitesse d'une orbite circulaire basse) et la *seconde vitesse cosmique* v_2 (vitesse de libération) en fonction de ces données.
 - b. On admettra que l'astre A forme un trou noir si $v_2 \rightarrow c = 3,00 \times 10^8$ m·s⁻¹ (célérité de la lumière). Exprimer le *rayon de Schwarzschild* (rayon d'un trou noir de masse M). Calculer ce rayon dans le cas d'un astre de même masse que celle du Soleil. Quelle est alors sa masse volumique ?
3. On étudie la trajectoire elliptique d'une étoile S2 de masse m en orbite elliptique autour du centre galactique A de masse $m_A \gg m$, à la période T .
 - a. Montrer qu'on peut déduire la masse m_A de la mesure de T et des caractéristiques de l'orbite de S2.
A.N. : $T = 15,2$ ans ; m_A est donnée dans l'annexe. Calculer le grand-axe de l'orbite de S2.
 - b. L'excentricité de l'orbite de cette étoile est $e = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}} = 0,7$, si d est la distance de S2 au centre galactique. Calculer d_{\min} ; commenter.
4. Avant d'identifier SgrA* à un trou noir quasi-ponctuel, on pouvait penser qu'il s'agissait d'un objet diffus, de masse volumique uniforme, le mouvement d'une étoile telle S2 se faisant alors à l'intérieur de cet objet.
 - a. Exprimer le champ gravitationnel qui règne à l'intérieur d'un tel objet diffus.
 - b. Décrire les équations du mouvement d'une étoile ponctuelle soumise à un tel champ de gravitation. Montrer que le mouvement en est soit circulaire, soit elliptique.

**Il sera accordé une grande importance aux qualités d'exposition.
Le candidat est invité, dès le début de son passage au tableau, à
présenter le sujet préparé de manière ordonnée et argumentée.**

Annexe

Les trous noirs

En astrophysique, un trou noir est un objet céleste si compact que l'intensité de son champ gravitationnel empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper. De tels objets ne peuvent ni émettre, ni réfléchir la lumière et sont donc noirs, ce qui en astronomie revient à dire qu'ils sont invisibles. Toutefois, plusieurs techniques d'observation indirecte dans différentes longueurs d'ondes ont été mises au point et permettent d'étudier les phénomènes qu'ils induisent. En particulier, la matière happée par un trou noir est chauffée à des températures considérables avant d'être « engloutie » et émet une quantité importante de rayons X. Envisagée dès le XVIII^e siècle, dans le cadre de la mécanique classique, leur existence — prédite par la relativité générale — est une certitude pour la quasi-totalité de la communauté scientifique concernée (astrophysiciens et physiciens théoriciens).

Il existe plusieurs sortes de trous noirs. Lorsqu'ils se forment à la suite de l'effondrement gravitationnel d'une étoile massive, on parle de trou noir stellaire, dont la masse équivaut à quelques masses solaires. Ceux qui se trouvent au centre des galaxies possèdent une masse bien plus importante pouvant atteindre plusieurs milliards de fois celle du Soleil ; on parle alors de trou noir supermassif (ou trou noir galactique). Entre ces deux échelles de masse, il existerait des trous noirs intermédiaires avec une masse de quelques milliers de masses solaires. Des trous noirs de masse bien plus faible, formés au début de l'histoire de l'Univers, peu après le Big Bang, sont aussi envisagés et sont appelés trous noirs primordiaux. Leur existence n'est, à l'heure actuelle, pas confirmée.

Il est par définition impossible d'observer directement un trou noir. Il est cependant possible de déduire sa présence de son action gravitationnelle : soit par les effets sur les trajectoires des étoiles proches ; soit au sein des microquasars et des noyaux actifs de galaxies, où de la matière, située à proximité, tombant sur le trou noir va se trouver considérablement chauffée et émettre un fort rayonnement X. Les observations permettent ainsi de déceler l'existence d'objets massifs et de très petite taille. Les seuls objets correspondant à ces observations et entrant dans le cadre de la relativité générale sont les trous noirs.

Sagittarius A*

Sagittarius A* (également abrégé en Sgr A*) est une source intense d'ondes radio, située dans la constellation du Sagittaire (coordonnées J2000 : ascension droite 17h 45m 40,045s, déclinaison $-29,00775^\circ$) et localisée au centre de la Voie lactée. Initialement non résolue au sein d'une zone d'émission radio plus vaste dénommée Sgr A, elle fut par la suite distinguée de l'ensemble des sources formant cette zone d'émission, avec Sgr A Est et Sgr A Ouest. L'utilisation de l'astérisque dans son nom signifie que contrairement à Sgr A Est et Sgr A Ouest, il s'agit d'une source quasi ponctuelle et non d'une source étendue.

Nature

Dans le courant des années 1990 s'est imposée l'idée que nombre de galaxies massives hébergeaient en leur sein un trou noir supermassif. S'il était logique que la Voie lactée ne fit pas d'exception à cette règle, son trou noir central fut plus difficile à mettre en évidence du fait de sa faible activité électromagnétique, résultant directement de la faible quantité de matière qu'il engloutit à l'heure actuelle. La première preuve consensuelle de l'existence d'un trou noir à l'origine de l'émission radio de Sgr A* fut obtenue à la fin des années 1990 où des observations à suffisamment haute échelle angulaire permirent de résoudre individuellement le nombre d'étoiles situées à proximité immédiate du centre géométrique de notre galaxie. En effet, ces étoiles sont tellement proches du trou noir central qu'elles orbitent autour de lui en quelques décennies, la plus rapide, dénommée S2, effectuant un tour complet autour du trou noir en environ 15 ans. Ainsi, il est possible en quelques années d'observation de mettre en évidence la portion d'orbite parcourue pendant cet intervalle de temps et d'en déduire la masse de l'objet central via la troisième loi de Kepler. Les mesures actuelles indiquent que l'objet central possède une masse d'environ 4 millions de masses solaires concentrées dans un rayon de 30 unités astronomiques. Aucune forme de matière connue autre qu'un trou noir n'est susceptible d'être aussi comprimée dans un tel espace étant donnée sa masse, tout en étant aussi peu lumineux.

Observations précédentes

En 2002, une équipe internationale conduite par Rainer Schödel de l'Institut Max Planck de physique extraterrestre a observé le mouvement de l'étoile S2 proche de Sagittarius A* sur une durée de 10 ans et obtenu la preuve que Sagittarius A* est un objet extrêmement massif et compact. Ces observations sont compatibles

avec l'hypothèse selon laquelle Sagittarius A* est un trou noir. Par déduction, la masse de Sagittarius A* est estimée à $3,7 \pm 1,5$ million de masses solaires ($1M_{\odot} = 1,99 \times 10^{30}$ kg), confinées dans un rayon de moins de 120 unités astronomiques (l'unité astronomique est la distance moyenne de la Terre au Soleil, soit environ $1 \text{ UA} = 1,49 \times 10^{11}$ m).

La trajectoire reconstituée de cette étoile (et de certaines de ses voisines) est représentée sur la **figure 1**.

En 2005, l'équipe de Shen Zhi-Qiang, après observation de Sagittarius A* par interférométrie, a montré que la radiosource compacte est contenue dans une sphère d'1 ua de rayon (soit la distance entre la Terre et le Soleil).

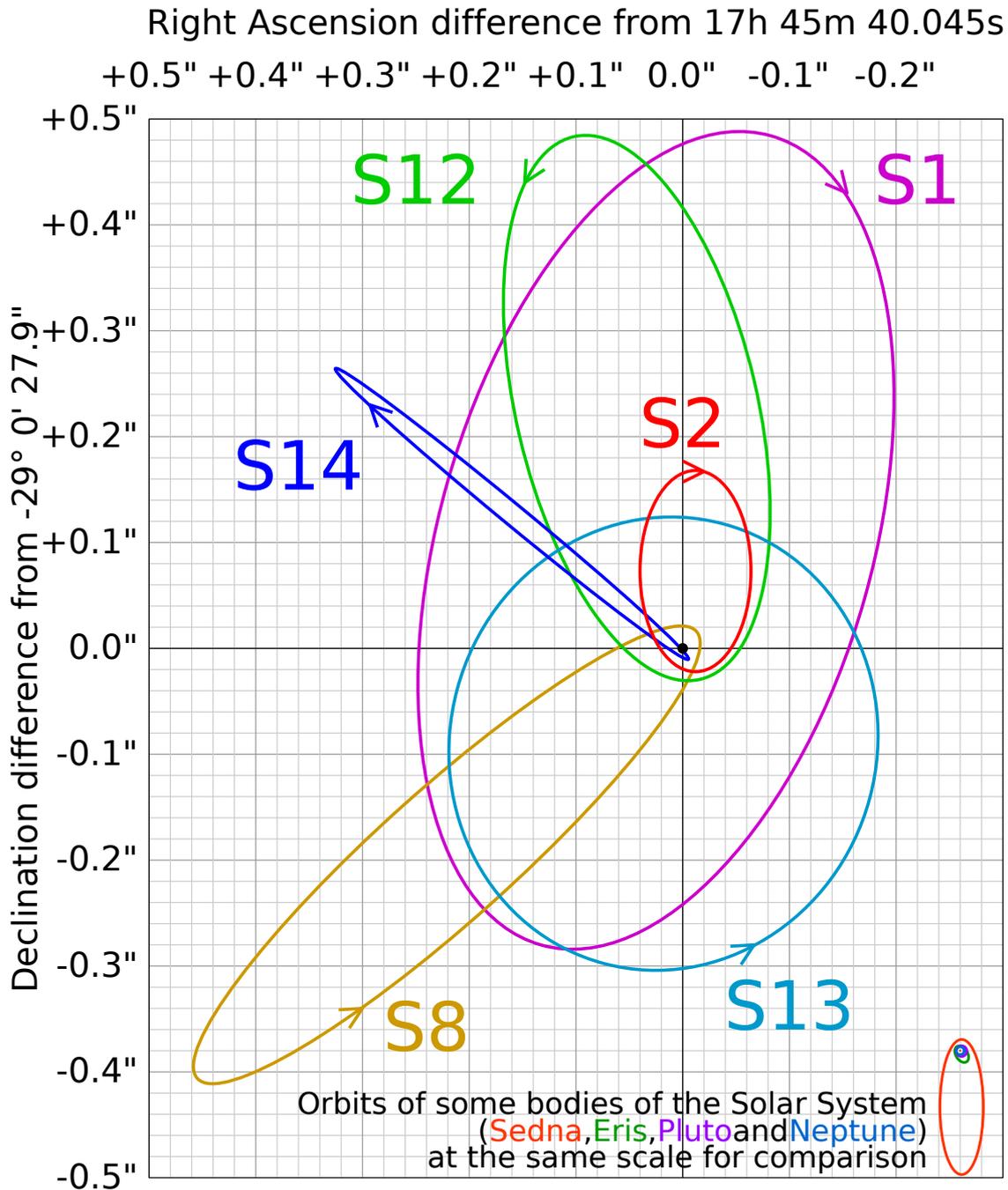


Figure 1 Orbites calculées de 6 étoiles autour du candidat trou noir supermassif Sagittarius A* au centre de la voie lactée. *Galactic centre orbits by Cmglee - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Wikimedia Commons*