EXERCICE I - UN TROU NOIR AU CENTRE DE LA GALAXIE (5 points)

Document 1 : Un trou noir massif au centre de la galaxie.

Depuis plusieurs années les astronomes tournent un regard de plus en plus acéré vers le centre de notre galaxie, soupçonné d'abriter un trou noir extrêmement massif. C'est une technique nouvelle, l'optique adaptative, qui a permis une percée décisive dans ce domaine de recherche. La finesse des images obtenues en infrarouge sur le Very Large Télescope (VLT situé au Chili), équipé du système d'optique adaptative NAOS, a rendu possible la détermination des orbites d'étoiles appartenant à un amas très dense autour du centre galactique. L'orbite d'une étoile particulière a permis de démontrer l'existence d'un trou noir (1) de 3 à 4 millions de masses solaires.

Le centre de notre galaxie.

Le voyageur qui se dirigerait vers le centre de notre galaxie serait sans doute frappé par la densité des étoiles autour de lui : un million de fois plus grande que dans la région de notre Soleil. Cette densité d'étoiles, il ne la soupçonnait pas quand il levait son regard dans cette direction du ciel, depuis la Terre : un voile opaque de grains de poussière submicroniques lui dissimulait totalement le cœur de la galaxie. En infrarouge cependant, la longueur d'onde devient nettement plus grande que la taille des particules de poussière et les ondes électromagnétiques peuvent se propager plus facilement.

La traque du trou noir en infrarouge.

Certaines étoiles très proches du centre galactique sont suivies depuis plusieurs années par une équipe internationale.

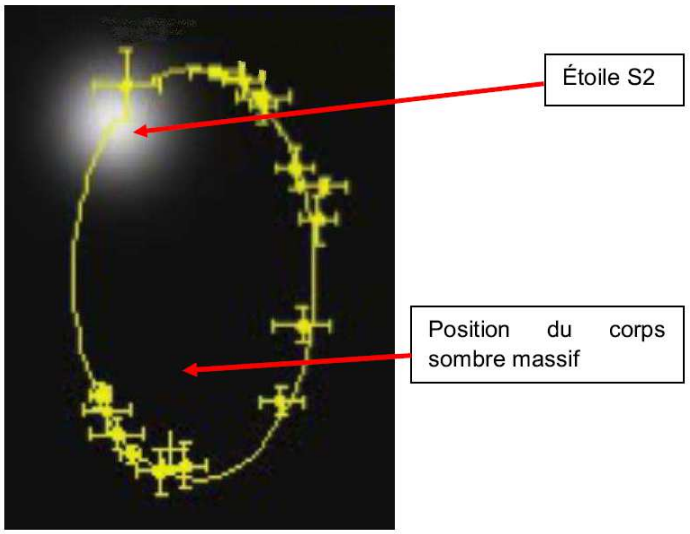
Les premières mesures ont révélé que ces étoiles décrivent des trajectoires elliptiques, ce qui implique effectivement qu'un objet sombre de plusieurs millions de masses solaires doit résider dans un volume très petit au centre de la galaxie. Il s'agissait là d'un premier résultat important.

C'est dans la période du printemps et de l'été 2002 que les choses se sont cristallisées.

La chance a voulu que d'une part l'une des étoiles surveillées - dénommée S2 - est passée au plus proche du centre de masse durant cette période et que, d'autre part, cette approche s'est faite à une distance remarquablement petite : seulement 17 heures-lumière.

Le fait que la trajectoire soit restée purement képlérienne(2) a ainsi permis d'éliminer définitivement toute possibilité que la masse de quelques millions de masses solaires soit sous forme d'un amas dense stellaire sombre. En effet la taille de toutes ces structures est bien plus grande que les 17 heures-lumière de la distance d'approche. Seule reste la possibilité du trou noir très massif.

D'après http://www.cnrs.fr/publications/imagesdelaphysique/couv-PDF/ldP2005/10Rouan.pdf



Données numériques :

Constante de gravitation universelle :
$G = 6{,}67 \times 10^{-11}$ m^3.s^{-2}.kg^{-1}

Masse du soleil :
$M_S = 2{,}0 \times 10^{30}$ kg

Célérité de la lumière dans le vide :
$c = 3{,}00 \times 10^{8}$ m.s^{-1}

Une heure-lumière est la distance parcourue par la lumière dans le vide en une heure.

(1) Trou noir : en astrophysique, un trou noir est un corps extrêmement massif dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche toute forme de matière ou de rayonnement de s'en échapper. De tels objets n'émettent donc pas de lumière et sont alors perçus comme étant noirs.

(2) Képlérienne : qui suit les lois de Kepler.

Document 2 : Principe de l'optique adaptative.

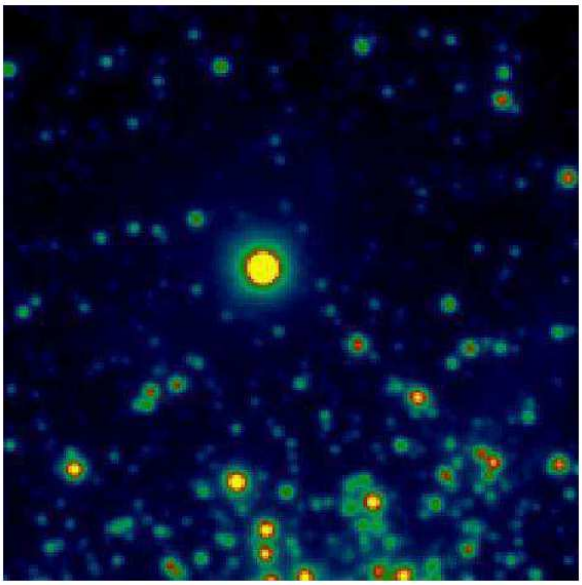
Parfois la nuit, nous avons l'impression que les étoiles scintillent. Ce n'est pas parce que l'étoile émet de la lumière d'une façon particulière mais parce que les turbulences atmosphériques déforment l'image.

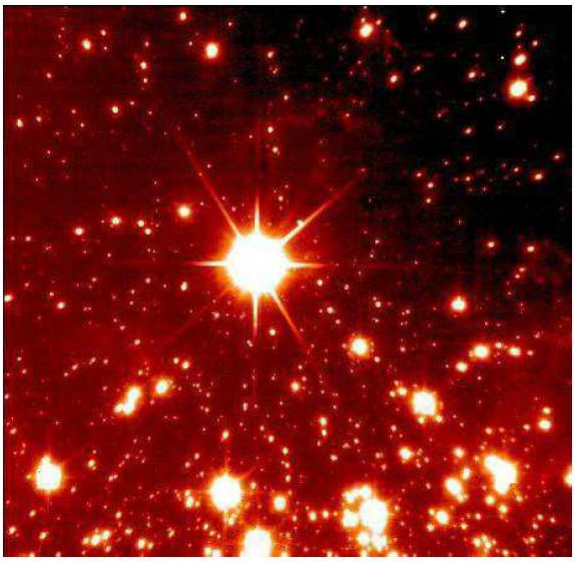
L'optique adaptative est une technique qui permet de corriger en temps réel les déformations de l'image donnée par un instrument d'optique, provoquées par les turbulences de l'atmosphère. Elle est notamment utilisée en astronomie par les télescopes au sol qui, en raison de ces turbulences, ont une qualité d'image dégradée.

On utilise une étoile brillante comme référence dans le champ de l'objet que l'on souhaite observer. On analyse la lumière provenant de cette étoile de référence pour estimer la perturbation due à l'atmosphère, puis on déforme un miroir (grâce à un système de pistons) de manière à compenser exactement cette perturbation. Ainsi l'image après réflexion sur le miroir est presque telle que s'il n'y avait pas eu de dégradation.

Document 3 : NAOS et l'optique adaptative.

Le système NAOS permet d'aiguiser le regard de l'un des quatre télescopes géants du VLT en lui redonnant la capacité de distinguer des détails d'autant plus fins que les miroirs sont de grande taille, capacité dont l'atmosphère l'avait privé.
NAOS permet, grâce à un ensemble de miroirs orientables, de corriger l'onde provenant d'un objet astronomique, celle-ci ayant été dégradée par sa traversée de l'atmosphère, afin de lui rendre sa forme initiale.
Restituée pratiquement telle qu'elle était avant son entrée dans l'atmosphère, cette onde peut alors être focalisée pour former une image quasi-parfaite sur une caméra. NAOS fournit ses images corrigées à CONICA, une caméra infrarouge.





Les images ci-dessus illustrent le gain remarquable apporté par l'optique adaptative NAOS en comparant la photo d'un même objet (...) obtenue sans optique adaptative (à gauche) et avec optique adaptative (à droite). Le nombre d'étoiles détectées, en particulier les étoiles de très faible éclat, est très supérieur sur l'image de droite.

D'après http://lesia.obspm.fr/NAOS.html

1. Mise en évidence de l'existence du trou noir.

Répondre aux questions suivantes en vous appuyant sur les documents 1, 2 et 3 :

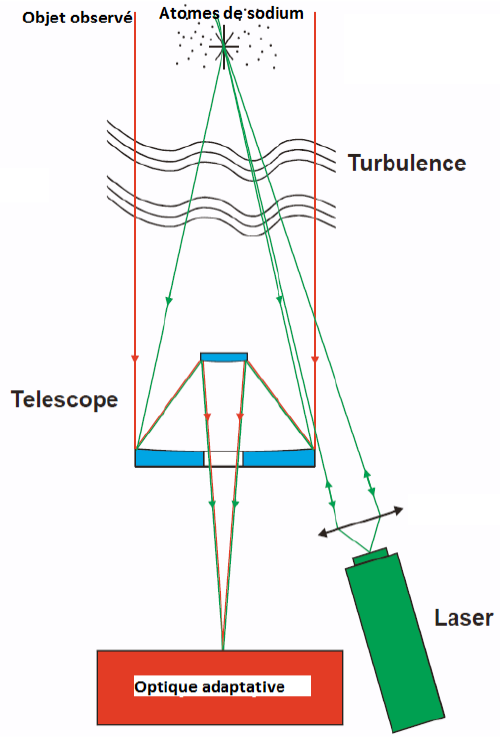
1.1 Énoncer la première loi de Kepler et, à partir de celle-ci, expliquer comment la détermination de la trajectoire de l'étoile S2 a permis de justifier l'existence d'un trou noir très massif au centre de la galaxie.

1.2 Pour quelle raison doit-on utiliser l'optique adaptative pour mettre en évidence la présence de ce trou noir ?

2. Nécessité d'une étoile guide laser pour étudier la trajectoire de S2.

Document 4 : Étoile guide laser.

En astronomie, une étoile guide laser est un système qui utilise un laser pour créer une étoile de référence lors des observations, c'est-à-dire une étoile brillante "artificielle", proche de l'objet observé, permettant d'utiliser l'optique adaptative. Sans cette étoile artificielle, l'utilisation de l'optique adaptative dépend de la proximité d'une étoile brillante avec l'objet observé. Une étoile guide laser a été installée sur Yepun, le quatrième télescope du Very Large Télescope.
Pour exciter les atomes de sodium de la mésosphère (située vers 90 km d'altitude) et ainsi créer une source de lumière artificielle, on utilise un laser dont la longueur d'onde est identique à celle de la lumière émise lors de la transition entre deux niveaux d'énergie du sodium.



Données :

Principales raies d'émission dans le visible de quelques éléments chimiques :

Elément chimique	Sodium	Hydrogène	Mercure
Longueur d'onde des principales raies d'émission dans le visible	589 nm	656 nm ; 486 nm	405 nm ; 436 nm 546 nm ; 577 nm 579 nm

Constante de Planck $h = 6{,}626 \times 10^{-34}$ J.s.
Charge élémentaire $e = 1{,}60 \times 10^{-19}$ C.

2.1 Expliquer pourquoi une étoile guide laser peut être nécessaire pour utiliser l'optique adaptative avec un télescope.

2.2 Justifier le choix d'une source laser pour créer une étoile guide.

2.3 Dans cette expérience, comment doit être choisie la longueur d'onde du laser ? Justifier.

2.4 Interpréter la création de l'étoile guide à l'aide d'un diagramme de niveaux d'énergie. Quelle information quantitative cette expérience nous permet-elle d'avoir sur ces niveaux d'énergie ?

3. Estimation de la masse du trou noir.

Pour déterminer un ordre de grandeur de la masse M du trou noir, on considère dans cette question que l'étoile S2, de masse m, décrit une orbite circulaire de rayon r = 132 heures-lumière, la période de révolution étant T = 15,2 ans.

3.1 Schématiser la trajectoire de l'étoile S2 et représenter, en plusieurs points de la trajectoire, l'étoile, son vecteur vitesse, son vecteur accélération.

3.2 Montrer que la valeur v de la vitesse de l'étoile S2 a pour expression : $v = \sqrt{\frac{G.M}{r}}$.

3.3 En déduire l'expression de la période de révolution T de l'étoile.

3.4 Déterminer la valeur de la masse M du trou noir et la comparer à celle annoncée dans le document 1.