

AVIS DE SOUTENANCE
Karim ABD EL DAYEM
Astronomie et Astrophysique

Soutiendra publiquement ses travaux de thèse intitulés

Effets relativistes sur les orbites des étoiles les plus proches du trou noir au centre de la Galaxie.

Soutenance prévue le **8 décembre 2025 à 13h00**

Lieu : Salle du château
5 Pl. Jules Janssen, 92190 Meudon, France

Composition du jury proposé

M. Frédéric VINCENT	Chargé de recherche	Observatoire de Paris (LIRA)	Directeur de these
Mme Marie-Christine ANGONIN	Astronome	Observatoire de Paris (LTE)	Membre du jury
Mme WEBB NATALIE	Astronome	IRAP	Rapporteur du jury
M. Christos CHARMOUSIS	Directeur de recherche	IJCLab	Rapporteur du jury
Mme Delphine PORQUET	Directeur de recherche	LAM	Membre du jury
M. Thibaut PAUMARD	Chargé de recherche	Observatoire de Paris (LIRA)	CoDirecteur de these

Mots-clés : Théorème de calvitie des trous noir, Spin, Relativité générale, Trou noir supermassif, Interférométrie, Sagittarius A*

Keywords : No-hair theorem for black holes, Spin, General relativity, Supermassive black hole, Sagittarius A*, Interferometry

Résumé :

L'observation astrométrique et spectroscopique des étoiles en orbite autour du trou noir supermassif au centre de notre Galaxie ($Sgr\sim A^*$) constitue une voie privilégiée pour mettre en évidence les effets relativistes et tester le théorème de «calvitie» des trous noirs. Cette étude peut être réalisé à travers le suivi de la précession orbitale induite par le taux de rotation (ou spin) et le moment quadrupolaire du trou noir. Des étoiles plus proches, plus fortement affectées par les effets liés au spin, pourraient être détectées dans un avenir proche grâce à l'interféromètre GRAVITY+. Nous caractérisons, par une approche analytique et numérique, les réorientations orbitales induites par le spin de $Sgr\sim A^*$ jusqu'au deuxième ordre post-newtonien (2PN), et évaluons les conditions d'observation nécessaires pour les mettre en évidence. Nous étudions également l'impact du choix du système de coordonnées sur l'interprétation des paramètres orbitaux, et explorons des stratégies pour améliorer les contraintes sur le spin en combinant les données de plusieurs orbites. En appliquant la méthode aux deux échelles de temps, nous obtenons des expressions analytiques à l'ordre 2PN décrivant l'évolution séculaire des paramètres orbitaux pertinents pour

l'observateur. J'ai étendu les modèles dynamiques existants — du képlérien et du Schwarzschild jusqu'au 2PN — pour inclure les termes de spin à 1.5PN et 2.5PN, les effets du moment quadrupolaire à 2PN, la précession de Schwarzschild à 3PN, ainsi que la contribution du spin au facteur de décalage spectral dans le modèle relativiste complet. Ces modèles sont comparés entre eux et à un tracé de rayons en relativité générale afin de déterminer les effets et ordres PN nécessaires selon les configurations orbitales. Je simule l'étoile S2 ainsi qu'une étoile hypothétique S2/10 (mêmes paramètres orbitaux que S2 mais avec un demi-grand axe dix fois plus petit) pour sonder le régime en champ fort. Je calcule également les différences d'ascension droite, de déclinaison et de vitesse radiale obtenues avec différents systèmes de coordonnées pour un même jeu d'éléments orbitaux osculateurs. Enfin, j'évalue le potentiel d'un ajustement combiné des orbites d'étoiles S connues et de la nouvelle étoile S301 pour contraindre l'amplitude et l'orientation du spin. Nous identifions trois vitesses de précession à l'échelle orbitale, traduisant le déplacement du périastre dans le plan et la réorientation hors du plan de l'ellipse osculatrice, et donnons leurs expressions à l'ordre 2PN ainsi que les décalages angulaires intégrés correspondants. Le choix du système de coordonnées peut induire des écarts en RA, DEC et RV comparables à la précision instrumentale actuelle, ce qui impose de préciser la temps d'osculation et le système de coordonnée utilisé avec les éléments orbitaux. Parmi les étoiles connues, S301 présente une sensibilité au spin comparable à S2/10 ; un ajustement conjoint avec d'autres étoiles aux orientations variées permet de réduire les dégénérescences et pourrait raccourcir le temps d'observation nécessaire pour contraindre les paramètres du spin de Sgr A*. En outre, nos prévisions indiquent que, si l'on ajuste uniquement la magnitude du spin, celle-ci pourra être contrainte avec une précision de l'ordre de $1\sigma \sim 0,1$ d'ici 2032, 0,05 d'ici 2034 et 0,03 d'ici 2036. Des performances similaires sont obtenues lorsqu'on ajuste simultanément l'ensemble des paramètres du spin. L'astrométrie reste la source principale de contraintes, mais la spectroscopie devient un atout majeur si la précision en vitesse radiale atteint le niveau de ~ 2 km/s, comme attendu avec MICADO. Dans l'ensemble, la détection du spin apparaît robuste pour peu que l'on dispose d'un suivi observationnel suffisant, l'orientation du spin jouant un rôle déterminant. La combinaison de données astrométriques et spectroscopiques issues de plusieurs étoiles constitue ainsi la stratégie la plus prometteuse.

Summary :

Measuring the astrometric and spectroscopic data of stars orbiting the central black hole in our galaxy (Sgr~A*) offers a promising way to detect relativistic effects and test the ``no-hair'' theorem through the monitoring of orbital precession induced by the spin and quadrupole moment of the black hole. Closer-in stars, more strongly affected by spin-related effects, may be detectable in the near future with GRAVITY+. We analytically and numerically characterize the orbital reorientations induced by spin-related effects of Sgr~A* up to second post-Newtonian (2PN) order, and assess the observational requirements to detect them. We also quantify the impact of coordinate system choice on the interpretation of orbital parameters, and explore strategies to improve spin constraints by combining multiple stellar orbits. Using the two-timescale method, we derive 2PN analytical expressions for the secular evolution of orbital parameters relevant to the observer. I implement and extend existing dynamical models---from Keplerian and Schwarzschild up to 2PN order---to include 1.5PN and 2.5 spin terms, 2PN quadrupole-moment effects, 3PN Schwarzschild precession, and the spin contribution to the redshift factor in the GR model. These models are compared to each other and to full GR ray tracing to determine which relativistic effects and PN orders are necessary for different orbital configurations. I simulate both the star S2 and a hypothetical S2/10 (same orbital parameters as S2 but with a ten times smaller semi-major axis) to probe the strong-field regime. I also compute the differences in right ascension, declination, and radial velocity when using different coordinate systems for the same osculating orbital elements. Finally, I investigate the combined-fitting potential of currently known S stars and the newly discovered S301 to constrain spin magnitude and orientation. We identify three orbital-timescale precession rates encoding the in-plane pericenter shift and out-of-plane redirection of the osculating ellipse, and provide their 2PN expressions together with the associated integrated angular shifts. Coordinate-system choices introduce discrepancies in RA, DEC, and RV that can reach the level of current instrumental precision, underscoring the need to explicitly state both the osculation time and coordinate system when reporting orbital elements. Among known stars, S301 shows spin sensitivity comparable to S2/10; jointly fitting it with other stars of diverse orientations mitigates degeneracies, potentially reducing the observational time needed to constrain the spin parameters.

Furthermore, quantitative forecasts show that, when only fitting the spin magnitude, the latter can be recovered with 1σ uncertainties of ~ 0.1 by 2032, ~ 0.05 by 2034, and ~ 0.03 by 2036. Comparable results are obtained when fitting all spin parameters. Astrometry provides the primary leverage on these constraints, while spectroscopy becomes highly complementary if radial-velocity precision reaches the ~ 2 km/s level expected with MICADO. Overall, spin detectability is robust provided sufficient monitoring, with orientation emerging as the key factor, and combined astrometric and spectroscopic datasets from multiple stars offering the most powerful path forward.