

Définition

Trou noir : la lumière ne peut s'échapper à l'infini

Question

Comment former un tel trou noir ?

Réponse

$$R < R_s = 2GM/c^2 \text{ (correct en relativité générale !)}$$

548

EXPOSITION

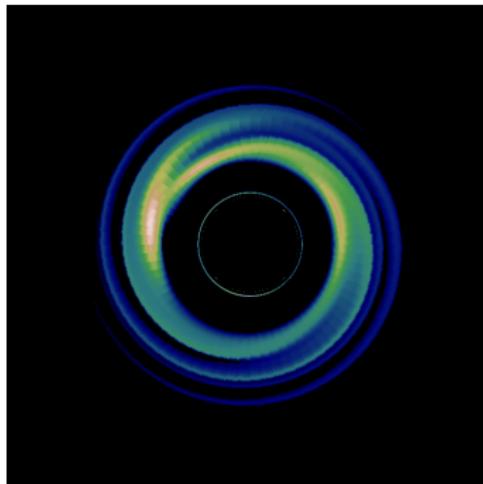
donc dans l'espace céleste, des corps obscurs aussi considérables, et peut-être en aussi grand nombre, que les étoiles. Un astre lumineux de même densité que la terre, et dont le diamètre seroit deux cent cinquante fois plus grand que celui du soleil, ne laisseroit en vertu de son attraction, parvenir aucun de ses rayons jusqu'à nous; il est donc possible que les plus grands corps lumineux de l'univers, soient par cela même, invisibles. Une étoile qui, sans être de cette

Exposition du système du monde, 2^e Ed., 1796



Pierre Simon de Laplace
(1749-1827)

Effets relativistes sur les processus de rayonnement



Frédéric VINCENT

- Postdoc CAMK - Varsovie,
M. Abramowicz
- ATER Université Paris 7 - APC
(2011-2012), P. Varnière
- Thèse LESIA/LUTH (2008-2011),
G. Perrin & E. Gourgoulhon
- M2 Astronomie & Astrophysique
(2008)
- École Centrale Paris (2007)



Relativité générale → observables

Objets compacts / Cosmologie

Nouvelle génération instrumentale

- **GRAVITY** [2015], **EHT** [2020],
Euclid [2020], **Athena** [2030], **eLISA** [2035]
- Différentes sondes de la gravitation
→ contreparties observables de la relativité générale

Ma recherche

- **modéliser** ces sondes de la gravitation
- préparer l'**interprétation des futures données**
- **physique relativiste dans des contextes variés**

Le code GYOTO

- **GYOTO = calcul de trajectoires relativistes**

objet compact, source → observateur

- → **développeur principal (80%)**
- → **interpréter / simuler** des données

Principes du code

- Trajectoires de particules près de
trous noirs / autres objets compacts
- → image, courbe de lumière, spectre
- Code **public** (<http://gyoto.obspm.fr>)

→ **Vincent, Paumard, Gourgoulhon, Perrin 2011**
Class. Quantum Grav. **28** 225011

GYOTO : interpréter des phénomènes relativistes

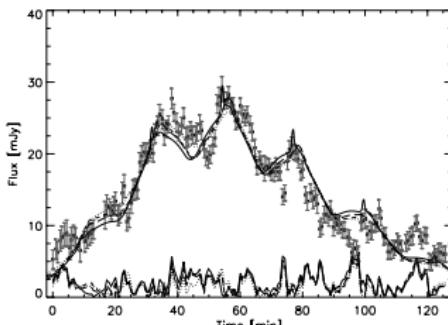
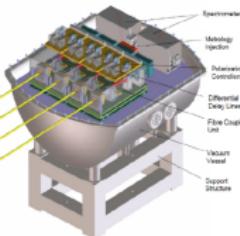
Réalisé

- Abords de Sgr A*
- Binaires X (oscillations)
- Images d'étoiles à neutrons

Futur

- Noyaux de galaxies / binaires X (spectre)
- Distorsion de galaxies (cosmologie)
- Phénomène de lentillage par Proxima Centauri

→ Impact astrophysique large
→ Lien entre communautés

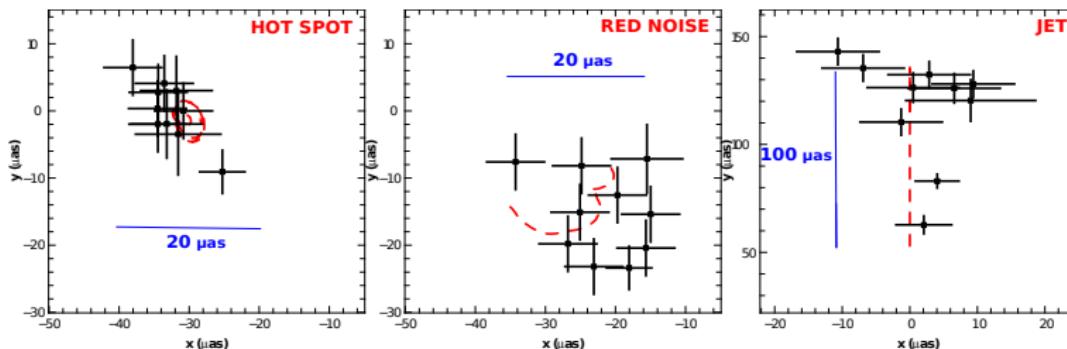


Hamaus et al., ApJ, 692, 902 (2009)

GRAVITY (2015) au centre galactique

- **Sursauts** de Sgr A* = source orbitant près de l'horizon
- **Précision astrométrique** : $\sigma = 10 \mu\text{as}$
- **Taille Sgr A*** : $\sigma = 50 \mu\text{as}$

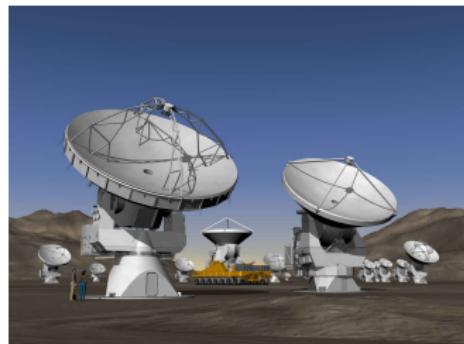
→ **Vincent, Paumard, Perrin et al. 2011**
MNRAS 412 2653



Sursauts de rayonnement de Sgr A*

- Simulation : **GYOTO + GRAVISM**
- Trois modèles étudiés
- Mise en évidence / invalidation du modèle du jet
- **GRAVITY peut distinguer les modèles de sursauts**

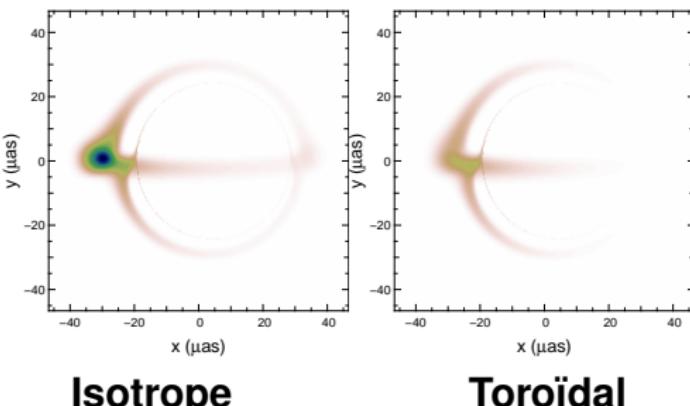
→ **Vincent, Paumard, Perrin, Varniere, Casse et al. 2014**
Accepté par MNRAS



ALMA (inclus dans l'EHT)

Event Horizon Telescope (2020)

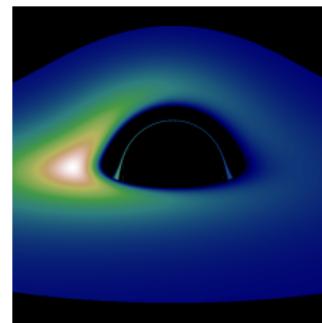
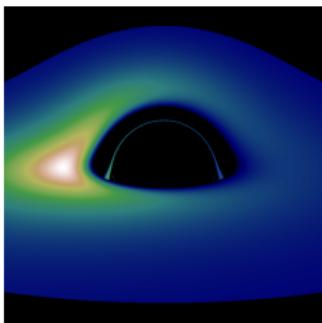
- Réseau interférométrique sub-mm
- **Résolution 20 μ as** → imagerie de Sgr A* (M87)
- Test de la gravitation en champ fort
- **Complémentarité avec GRAVITY** (variabilité/imagerie)
- → simulations d'observation EHT au centre galactique



Tore d'accrétion magnétisé entourant Sgr A*

- Champ magnétique isotrope / toroïdal
- Calcul de l'image synchrotron en sub-mm
- **Signature de la géométrie du champ magnétique dans les futures données EHT**

→ Yan, Vincent, Abramowicz, Zdziarski, 2014, en prép.

Relativité générale (**rotation lente**)Chern-Simons (**rotation lente**)

Trou noir de Chern-Simons

- **Rotation lente** : pas de différence observable
- **Rotation rapide** → métrique numérique
→ **GYOTO** [Sgr A*]

→ **Vincent, 2014, *Class. Quantum Grav.*, 31, 025010**

Projet de recherche

Nouvelle génération instrumentale

- GRAVITY (2015) , EHT (2020),
Euclid (2020), Athena (2030), eLISA (2035)
- **Sondre différents phénomènes relativistes**
- *Tester l'hypothèse d'homogénéité de l'Univers
à l'échelle cosmologique ? – Euclid*
- *Tester la relativité générale en champ fort – EHT*

Euclid : tester les hypothèses cosmologiques

[2020]

- Objectif d'Euclid : *Cartographie des grandes structures*
- Question-clé : *Pertinence de l'hypothèse d'homogénéité de l'Univers ?*
Impact : **formation des structures, géométrie espace-temps**
- Développement de GYOTO : **déviation géodésique**
 - simulation de distorsion de galaxies
 - pour un Univers homogène/non-homogène
- **Conséquences observables d'un Univers non-homogène ?**
 - tester l'homogénéité de l'Univers sur les données Euclid

Équipes Grandes structures / GReCO

- **mon expérience** GYOTO dans un contexte cosmologique
- **expertise IAP** : *Y. Mellier, C. Pichon, C. Pitrou, J.-P. Uzan ...*

EHT : imager les abords de Sgr A*

[2020]

- Projet **Black Hole Cam** (PI Rezzolla, financement **ERC, 14M€**)
→ **intégration de l'IAP au projet EHT**
- **Astrophysique**
Sonder les propriétés astrophysiques aux **abords de Sgr A***
- *Test de la gravitation aux abords de l'horizon ?*
Simulations d'observation de **trous noirs / objets alternatifs**
Différencier un trou noir d'un objet alternatif avec l'EHT ?

Équipe Cosmologie et hautes énergies

- **mon expérience** : simulations d'observation, objets compacts
- **expertise IAP** :
M. Volonteri, J.-P. Lasota, E. Barausse, C. Pitrou, J.-P. Uzan ...

Ancrage à l'IAP

2020 (futur proche)

- ***Euclid*** : test du principe d'homogénéité
→ Collab. **Mellier, Pichon, Uzan**
- ***EHT*** : astrophysique des abords de Sgr A*
→ Collab. **Volonteri, Uzan**

2030 (perspective long terme)

- ***Athena*** : mesure de spins de trous noirs
→ Collab. **Volonteri**
- ***eLISA*** : mesure de spins, tests de gravitation
→ Collab. **Volonteri, Blanchet** (multi-messagers ?)

→ Ancrage dans **3 missions spatiales** ESA (M2+L2,3)

Expérience d'enseignement à l'Université

- Total en L1-L3 : ≈ 300 h
- 3 ans de **monitorat UPMC**, 1 an de **1/2-ATER Paris 7**

Monitorat

- LP 111 (*Mouvement et énergie*) (L1)
- TD, TP, IO : **différentes approches** pédagogiques

ATER

- TP Algo (L3), TD quantique (L3), TP mécanique (L1)
- Expérience à **différents niveaux**
- **Responsabilité** plus importante

Expérience de diffusion des connaissances

- Collaboration avec l'Ambassade de France à Varsovie
- Partenariat avec le **Lycée français de Varsovie**

Visite du Centre Copernic

- Mai 2013 ; groupe de Première/Terminale
- **Mini-présentations** par certains membres du Centre
- **Questions-réponses**

Conférence grand public

- Devant la classe de Terminale S
- Présentation de mes thèmes de recherche
- **Discussion : métier de chercheur, études scientifiques**

Enseignement L1

- UE ***Concepts et Méthodes de la Physique***
- Mon expérience dans cette UE (TD, TP, IO)
- Prêt à assurer des cours magistraux
- ***Sections de renforcement***

Enseignement L2/L3

- Parcours ***Fondements de la Physique***
- En particulier : quantique, ondes
- **Nouvelle maquette L2** (mineure/majeure)

Enseignement M

- M1 ***Physique fondamentale*** (relativité, astro)
- M2 ***Astronomie & Astrophysique***
- Importance de l'**enseignement dans ma spécialité**



Enseignement interactif

- Interaction, esprit critique
- **Rudolph et al. 2014** : notes, retours étudiants
- **Prêt à m'investir**

Résolution de problème

- Autonomie, prise d'initiative
- **Formation à la vie professionnelle**

Diffusion

- UPMC : **Chercheurs au lycée**
- IAP : stages, **Fête de la Science**

Conclusion

Enseignement

- Expérience de 300 h L1-L3
- Parcours Physique (L1-M2)
- Nouvelles *approches pédagogiques*

Euclid

- Test de l'hypothèse d'*homogénéité*
- *Signatures observables par Euclid*

Event Horizon Telescope

- Astrophysique des *abords de Sgr A**
- *Test relativité générale*

- **11 publications rang A ; 7 en premier auteur**
- Mes publications **2013-2014** :

F. H. Vincent, T. Paumard, G. Perrin, P. Varniere, F. Casse, F. Eisenhauer, S. Gillessen, P. J. Armitage, *Distinguishing an ejected blob from alternative models at the Galactic centre with GRAVITY*, accepté par MNRAS (**2014**)

F. H. Vincent, G. P. Mazur, O. Straub, M. A. Abramowicz, G. Torok, P. Bakala, *Spectral signature of oscillating slender tori surrounding Kerr black holes*, accepté par A&A (**2014**)

F. H. Vincent, *Testing Chern-Simons gravity with black holes ?*, Class. Quantum Grav., 31, 025010 (**2014**)

G. P. Mazur, **F. H. Vincent**, M. Johansson, E. Sramkova, G. Torok, P. Bakala, M. Abramowicz, *Towards modeling quasi-periodic oscillations of microquasars with oscillating slender tori*, A&A, 554, A57 (**2013**)

F. H. Vincent, H. Meheut, P. Varniere, T. Paumard, *Flux Modulation from the Rossby Wave Instability in microquasars' accretion disks*, A&A, 551, A54 (**2013**)

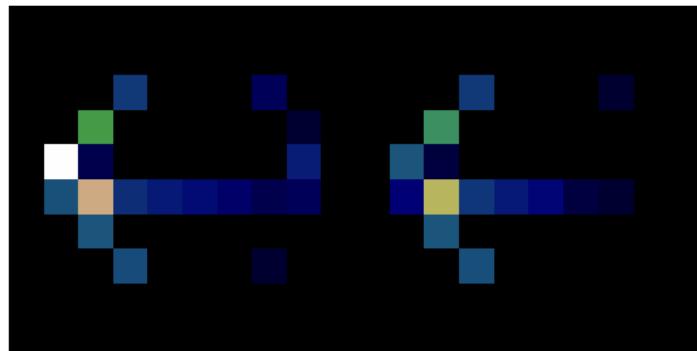
Athena : mesure de spin par spectrométrie

[2030]

- GYOTO : **raie du Fer** → interpréter les données
- Contrainte du **spin** du trou noir central (XRB, AGN)
Impact sur les théories d'**évolution des trous noirs** (ERC Volonteri)

Équipe Cosmologie et hautes énergies

- **mon expérience** : phénomènes d'émission des binaires X / AGN
- **expertise IAP** : *M. Volonteri, J.-P. Lasota*



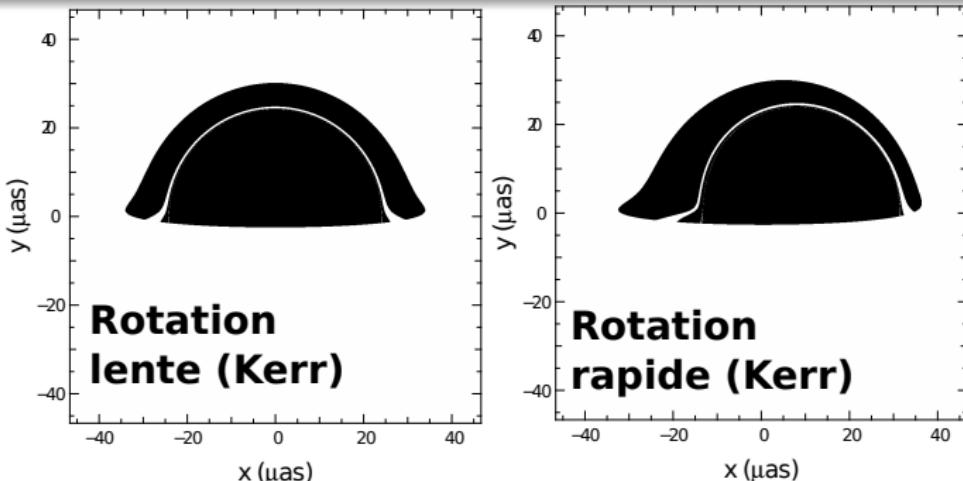
Isotrope

Toroïdal

Tore d'accrétion magnétisé entourant Sgr A*

- Champ magnétique isotrope / toroïdal
- Calcul de l'image synchrotron en sub-mm
- **Signature de la géométrie du champ magnétique dans les futures données EHT**

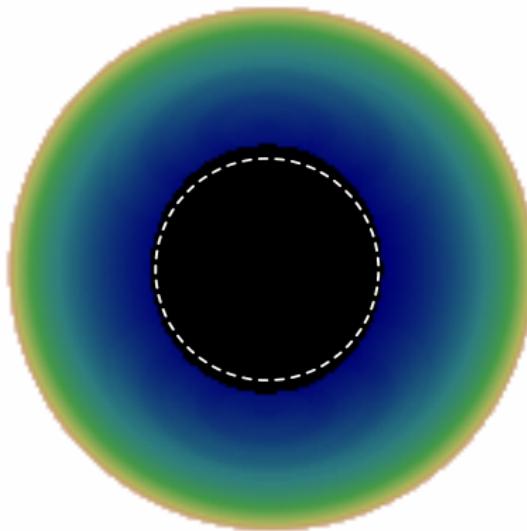
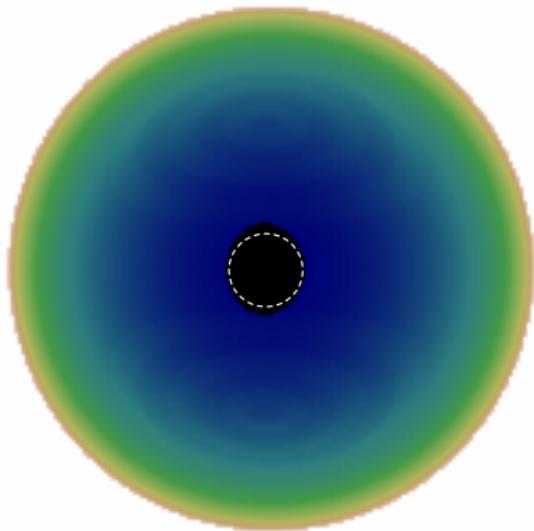
→ Yan, **Vincent**, Abramowicz, Zdziarski, 2014, en prép.



Trou noir de Chern-Simons

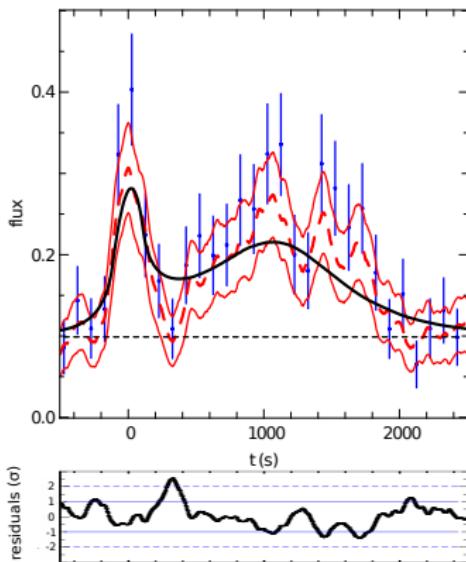
- Première étape : **rotation lente** → **métrique analytique**
- Différence de taille angulaire $< 0.01 \mu\text{as}$ (EHT=20 μas)
- Sgr A* : **rotation rapide** → **métrique numérique**
- Nécessité d'utiliser **GYOTO**

→ Vincent, 2014, *Class. Quantum Grav.*, **31**, 025010



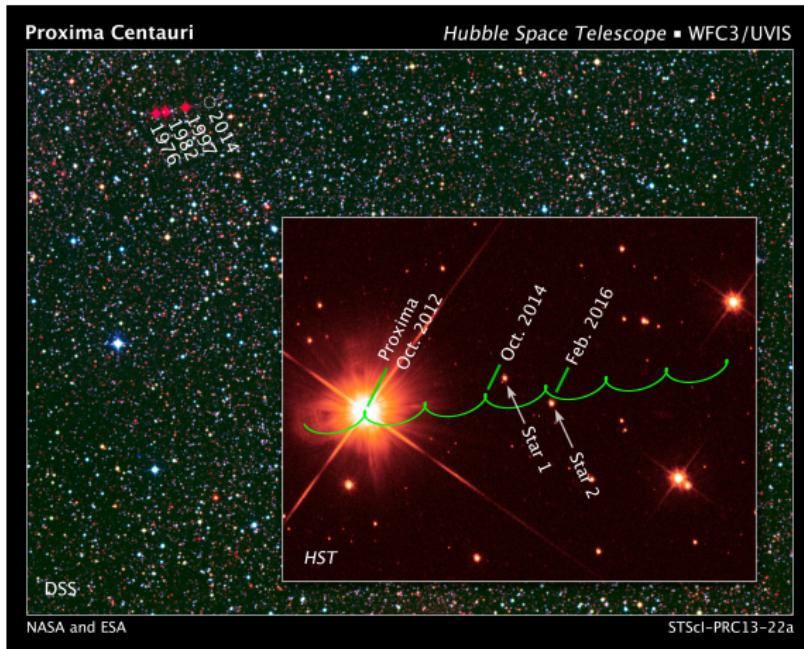
Simulations en **espace-temps numérique** par GYOTO
Étoile à neutrons **en rotation rapide (1000 Hz)**.

→ **Vincent, Novak, Gourgoulhon 2014, en prép.**



Sursaut X de Sgr A*, ajustement GYOTO

→ Mossoux, Grosso, **Vincent**, Porquet, et al. 2014, en prép.



Lentillage par Proxima Centauri d'une étoile d'arrière plan
Décalage astrométrique : ≈ 0.7 mas ($= 4GM/\theta Dc^2$)