



**PHAST**  
PHYSIQUE  
ET ASTROPHYSIQUE  
UNIVERSITÉ DE LYON

**ÉCOLE  
DOCTORALE**  
— 52 —

Université Claude Bernard  Lyon 1



## Trous noirs primordiaux et matière noire

### Journée des doctorant·es

**Jérémy Auffinger**

IP2I & UCBL

Sous la supervision de Alexandre Arbey

**JDD – 26 Octobre 2021**

## Sujet et contexte

Cette thèse a pour but de :

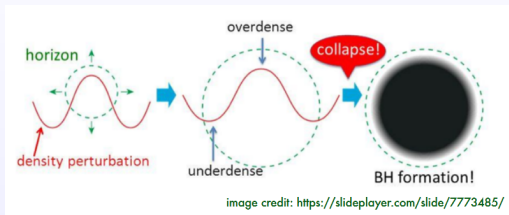
- approfondir l'étude des **contraintes issues de la radiation de Hawking** sur l'abondance des trous noirs primordiaux dans l'univers ;
- contribuer à répondre à la question de savoir si les trous noirs primordiaux constituent une **fraction de la matière noire** ;
- trouver des manières de lier la radiation de Hawking à la nucléosynthèse primordiale et aux ondes gravitationnelles.

## Contexte

- regain d'intérêt fort pour les PBHs suite aux observations de LIGO/VIRGO/EHT ;
- matière noire pas découverte dans les expériences de physique des particules ;
- détections d'ondes gravitationnelles et de "l'ombre" des trous noirs  $\implies$  accès à des données fines sur la structure des trous noirs ;
- paradoxe de l'information non résolu.

## Les trous noirs primordiaux

### Formation



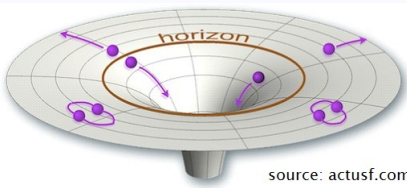
$$M \sim 10^{15} \text{ g} \times \left( \frac{t_{\text{form}}}{10^{-23} \text{ s}} \right)$$

### Motivations

- masses possibles pour la matière noire :  $10^{17} - 10^{22} \text{ g}$  et  $\mathcal{O}(10) \times M_{\odot}$  ;
- détections de coalescences "inattendues" (masses, spin) à LIGO/VIRGO ;
- développement de l'**astronomie gravitationnelle** et possible détection dans un futur proche du fond diffus primordial  $\implies$  accès à la signature de la formation des PBHs.

## Principe

### Formule de Hawking



Taux d'émission pour une particule  $i$  :

$$Q_i \equiv \frac{d^2 N_i}{dt dE} = \frac{1}{2\pi} \sum_{l,m} \frac{\Gamma_{s_i}^{l,m,dof}(E, M, \mu_i, \dots)}{e^{E'/T} - (-1)^{2s_i}}$$

$s_i$  : spin,  $E$  : énergie,  $M$  : masse du PBH,  
 $\mu_i$  : masse au repos

### Facteurs de "corps gris"

Calculés à partir des équations du mouvement dans la métrique à l'extérieur du trou noir.

Cas à symétrie sphérique :  $ds^2 = -G(r)dt^2 + F(r)^{-1}dr^2 + H(r)d\Omega^2$

### Température de Hawking

$T$  dépend de la métrique :

$$\begin{cases} T_{\text{sph}} = \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{FG'^2}{G}} \\ T_{\text{K}} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{r_+ - M}{r_+^2 + a^2 M^2} \right)^{\text{hor}} \end{cases}$$



## Évolution des PBHs

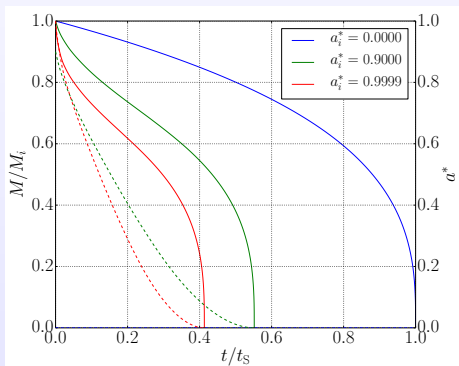
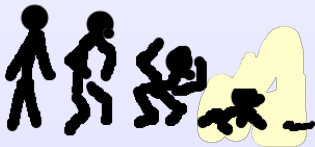
Coefficients de Page (ex. : Kerr,  $a^* \equiv J/M^2 \in [0, 1[$ )

$$\begin{cases} f \equiv -M^2 \frac{dM}{dt} = M^2 \int_0^{+\infty} \sum_{i,l,m,dof} \frac{E}{2\pi} \frac{\Gamma_{s_i}^{l,m}}{e^{E'/T} - (-1)^{2s_i}} dE \\ g \equiv -\frac{M}{a^*} \frac{dJ}{dt} = \frac{M_{\text{BH}}}{a^*} \int_0^{+\infty} \sum_{i,l,m,dof} \frac{m}{2\pi} \frac{\Gamma_{s_i}^{l,m}}{e^{E'/T} - (-1)^{2s_i}} dE \end{cases} \iff \begin{cases} \frac{dM}{dt} = -\frac{f}{M^2} \\ \frac{da^*}{dt} = \frac{a^*(2f - g)}{M^3} \end{cases}$$

Exemple [arXiv:1906.04196]

Co-évolution de  $M$  et  $a^*$  : le trou noir perd rapidement son moment angulaire.

DARWIN



## Calcul des facteurs de "corps gris"

## Calcul général

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Eq. mvt} \\ \text{métrique} \end{array} \right. \xrightarrow[\text{simplification}]{\text{séparation}} \text{Equation d'onde : } \frac{d^2 Z}{dr^{*2}} + (E^2 - V(r^*))Z = 0 \xrightarrow[\text{numérique}]{\text{résolution}} \text{Coef. transm. : } \Gamma$$

Exemple en symétrie sphérique [arXiv:2101.02951,arXiv:2107.03293]

$$V_0(r^*) = \nu_0 \frac{G}{H} + \frac{\partial_*^2 \sqrt{H}}{\sqrt{H}}$$

$$V_1(r^*) = \nu_1 \frac{G}{H}$$

$$V_2(r^*) = \nu_2 \frac{G}{H} + \frac{(\partial_* H)^2}{2H^2} - \frac{\partial_*^2 \sqrt{H}}{\sqrt{H}}$$

$$V_{1/2}(r^*) = \nu_{1/2} \frac{G}{H} \pm \sqrt{\nu_{1/2}} \partial_* \left( \sqrt{\frac{G}{H}} \right)$$



→ Résoudre le problème de la dépendance à Mathematica ?

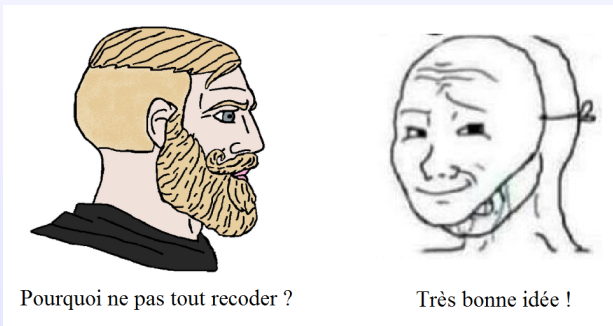
## BlackHawk

### Contexte

- anciens codes pour la physique des accélérateurs (Charybdis, BlackMax) ;
- pas de calcul numérique précis (et disponible) des facteurs de "corps gris" ;
- pas de calcul récent des coefficients de Page.

### Idée de génie

→ Tout refaire depuis le début !



## BlackHawk

Développement de BlackHawk [arXiv:1905.04268,arXiv:2108.02737]

Le code est accessible à l'adresse <https://blackhawk.hepforge.org/>

- Home
- Description
- Manual
- Download
- Contact

## BlackHawk

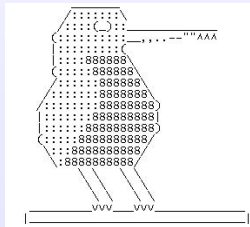
By **Alexandre Arbey** and **Jérémy Auffinger**

### Calculation of the Hawking evaporation spectra of any black hole distribution

BlackHawk is a public C program for calculating the Hawking evaporation spectra of any black hole distribution. This program enables the users to compute the primary and secondary spectra of stable or long-lived particles generated by Hawking radiation of the distribution of black holes, and to study their evolution in time.

**If you use BlackHawk to publish a paper, please cite:**

A. Arbey and J. Auffinger, *Eur. Phys. J. C* 79 (2019) 693, arXiv:1905.04268 [gr-qc]





## BlackHawk

### Description & contenu :

- BlackHawk est un code **public** et **libre** écrit en C ;
- BlackHawk est **gratuit** ;
- il permet de calculer les **facteurs de "corps gris"** ainsi que l'**évolution** des PBHs ;
- il permet de calculer les **spectres secondaires** grâce à l'interface avec des **codes de physique des particules**.



## BlackHawk

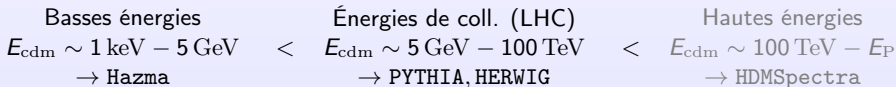
### Spectres secondaires

Les particules produites par radiation de Hawking ne sont pas toutes stables :  
hadronisation, désintégration, radiation...

### Schéma de principe

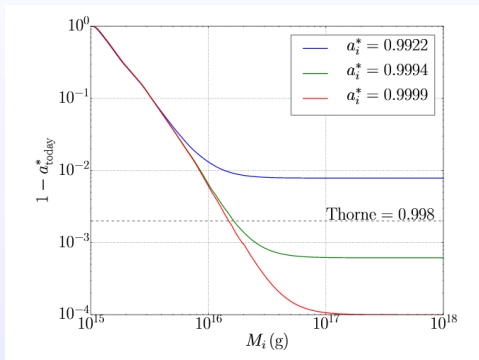


### Interfaces



## Résultats : Évolution du spin des trous noirs

[arXiv:1906.04196]

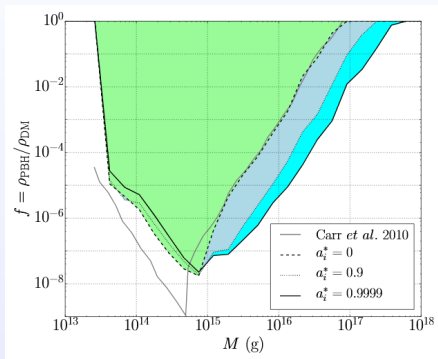


$a_i^*$  : moment angulaire initial  
 $a_{today}^*$  : moment angulaire  
aujourd'hui

→ Il est possible de dépasser les limites astrophysiques sur le spin pour des trous noirs primordiaux.

## Résultats : Contraintes sur les trous noirs en rotation

[arXiv:1906.04750]



Contrainte obtenue en comparant le spectre de photons émis par les PBHs pour  $E \sim \text{MeV} - \text{GeV}$  au fond diffus isotropes de rayonnement gamma.

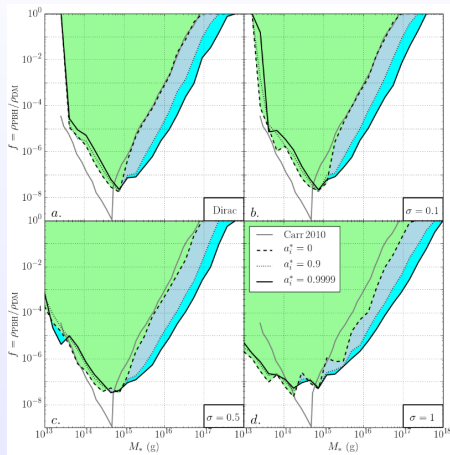
$f$  : fraction de la matière noire (cosmologique) sous la forme de PBHs

$a_i^*$  : moment angulaire initial

→ Le moment angulaire des trous noirs, en augmentant leur taux d'émission de particules, modifie drastiquement les contraintes issues de la radiation de Hawking...

## Résultats : Contraintes sur les trous noirs en rotation

[arXiv:1906.04750]



Même contrainte.

$f$  : fraction de la matière noire (cosmologique) sous la forme de PBHs

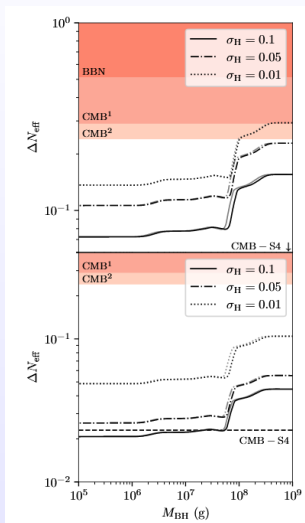
$a_i^*$  : moment angulaire initial

$\sigma$  : déviation standard de la distribution de masses

→ ... ainsi qu'une éventuelle dispersion de la masse.

## Résultats : Contraintes sur les trous noirs en rotation

[arXiv:2104.04051]



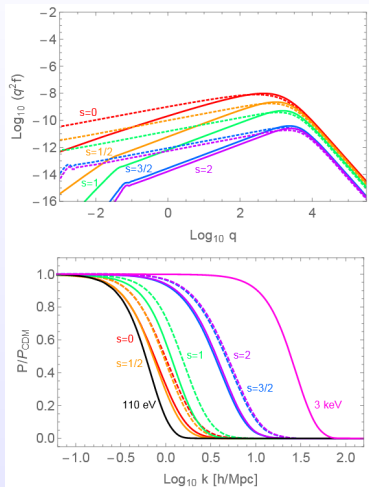
Contrainte obtenue en comparant le spectre de gravitons émis par les PBHs pour  $E \sim \text{TeV} - M_{\text{P}}$  avec les limites sur le nombre effectif de neutrinos  $N_{\text{eff}}$  au moment de la BBN et du CMB.

$\sigma_{\text{H}}$  : déviation standard du spectre de puissance des perturbations primordiales

→ D'éventuels PBHs en rotation seront détectables dans les prochaines expériences de mesure du CMB (notamment CMB Stage 4).

## Résultats : Contrainte sur les modèles mixtes DM-PBH

[arXiv:2012.09867]



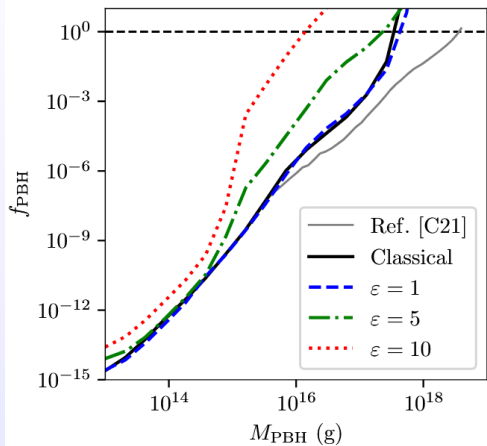
Contrainte obtenue en comparant l'abondance et le spectre en impulsion de la "warm dark matter" émise par les PBHs avec les mesures de spectre des structures à petite échelle sur le CMB.

$s$  : spin de la particule "warm dark matter"  
lignes pleines (pointillées) : domination de la radiation (des trous noirs) avant la BBN

→ Des contraintes très fortes existent sur les modèles mixtes à cause de la haute énergie de la radiation de Hawking.

## Résultats : Trous noirs primordiaux non standards

[arXiv:2101.02951, arXiv:2107.03293]



Contrainte obtenue en comparant le spectre de photons émis par les PBHs non standards (PBHs polymérisés issus de la "gravité quantique à boucles") avec la sensibilité de AMEGO, qui mesurera le rayonnement gamma notamment au centre de la galaxie.

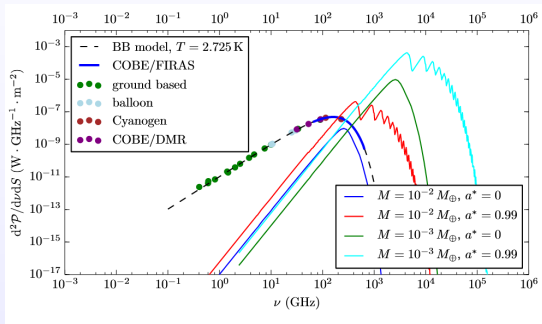
$\varepsilon$  : échelle des déformations de l'espace-temps dues à la polymérisation en LQG

→ Les théories au-delà de la relativité générale prédisent des signaux très différents en termes de radiation de Hawking.



## Résultats : Trous noirs primordiaux dans le Système Solaire

[arXiv:2006.02944]



Comparaison entre le rayonnement émis par un PBH du type "Planet 9" dans notre Système Solaire et le CMB.

$\mathcal{P}$  : puissance émise sous forme de photons  
 $M$  : masse du PBH  
 $a^*$  : spin du PBH

→ Un trou noir primordial de masse planétaire dans notre Système Solaire émettrait un rayonnement de Hawking théoriquement mesurable *in-situ*.

## Conclusions & Perspectives

### Conclusions

- BlackHawk est un **super code** qui n'a absolument **pas de bugs** ;
- BlackHawk a **plein d'applications** dans des domaines divers ;
- ...
- ~~je cherche un postdoc.~~



### Perspectives

- continuer à mettre à jour BlackHawk ;
- discuter d'autres trous noirs non-standards ;
- discuter des trous noirs "quasi-extrêmes" ;
- discuter de la présence de trous noirs primordiaux dans les systèmes planétaires (extra) solaires...