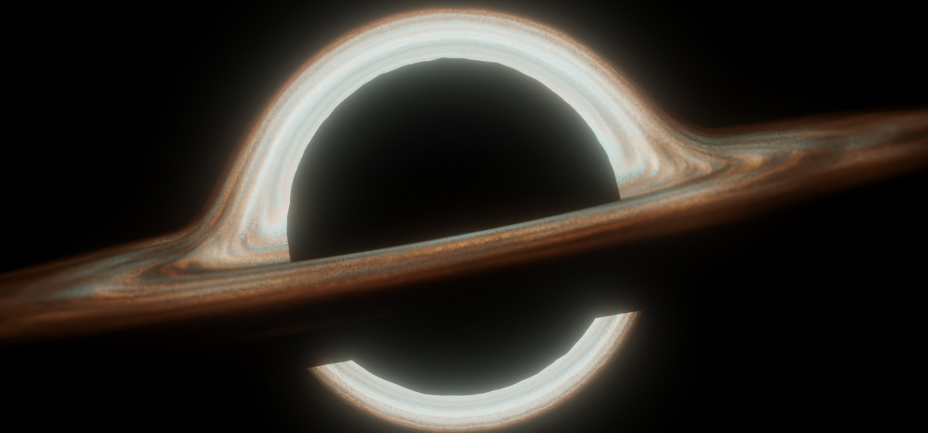


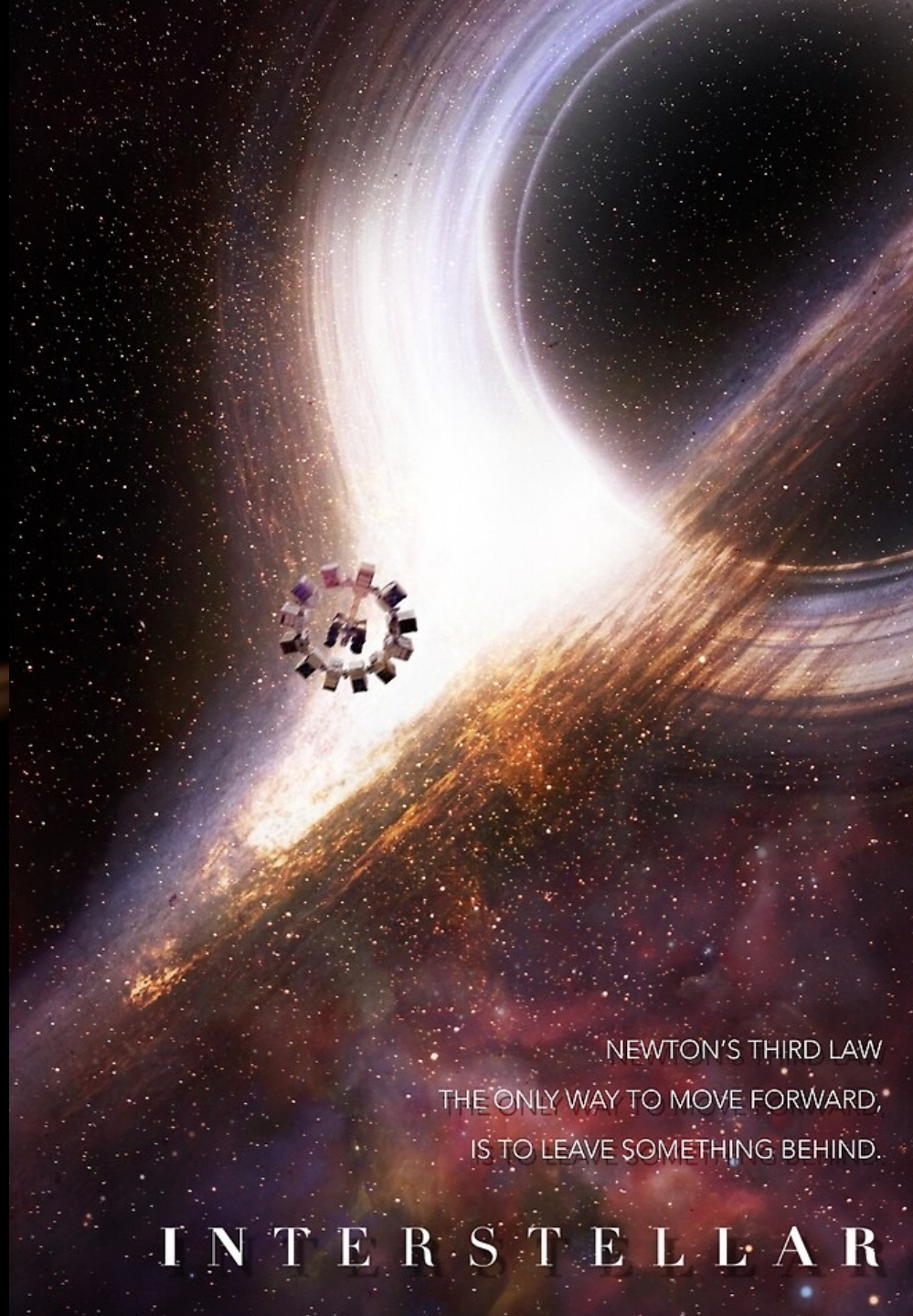
JEAN-PIERRE LUMINET

# VOYAGER DANS UN TROU NOIR

AVEC INTERSTELLAR



DUNOD



NEWTON'S THIRD LAW  
THE ONLY WAY TO MOVE FORWARD,  
IS TO LEAVE SOMETHING BEHIND.

INTERSTELLAR

**Equations d'Einstein :**  $G_{\mu\nu} = k T_{\mu\nu}$   
(courbure = matière-énergie)

← Faible Gravité (Système Solaire)

Forte Gravité (Etoile dense)



Event  
Horizon



**Très forte gravité:  
Trou noir**

Métrieque :  $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

# Quelques fausses idées

- Un trou noir n'est pas forcément « petit »
- Un trou noir n'est pas forcément « dense »
- Un trou noir n'est pas forcément « singulier »

- Des microscopiques aux ultramassifs
- Les objets les plus simples de la nature

La **solution de Kerr** est entièrement définie  
par deux paramètres :

$$(M, J)$$
$$0 < J/J_m < 1$$

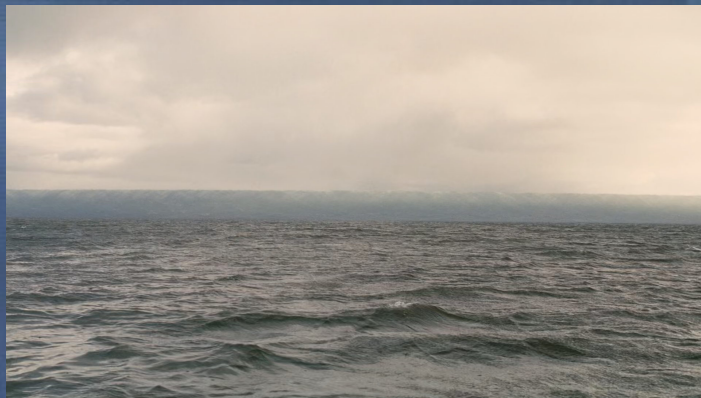


Dans *Interstellar*, **Gargantua** est un trou noir de Kerr

- supermassif : 100 millions de masses solaires
- en rotation ultra-rapide : spin = 0,999999999

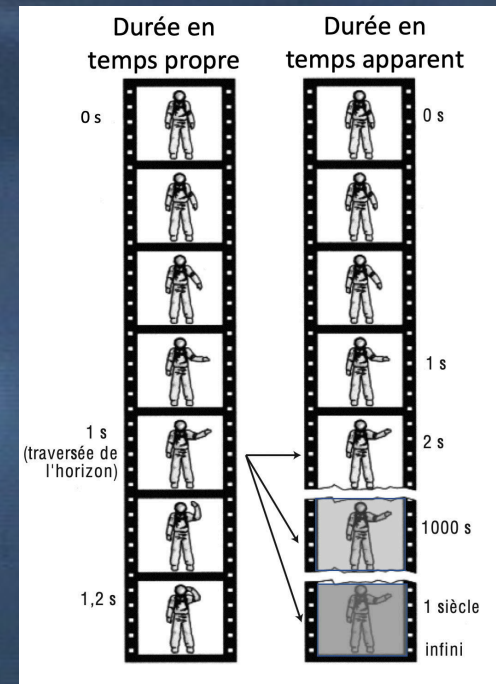
# Distorsions de l'espace-temps (1)

→ Forces de marée



# Distorsions de l'espace-temps (2)

## → Dilatation temporelle



*Interstellar* : « Chaque heure que nous passerons sur cette planète correspondra à sept années passées sur Terre »

→ **Facteur de 60 000 !**

$$\frac{1.334 \times 10^{-10} M^3 r}{8.98755 \times 10^{16} M^2 r^2 + J^2 \cos^2 \theta} = \frac{3369802499}{3369802500}$$

# Voir l'ombre d'un trou noir

Vues  
« d'artiste » :  
fausses!



# Première image théorique de trou noir

Image du dessus

Anneau de photons

Dernière orbite stable

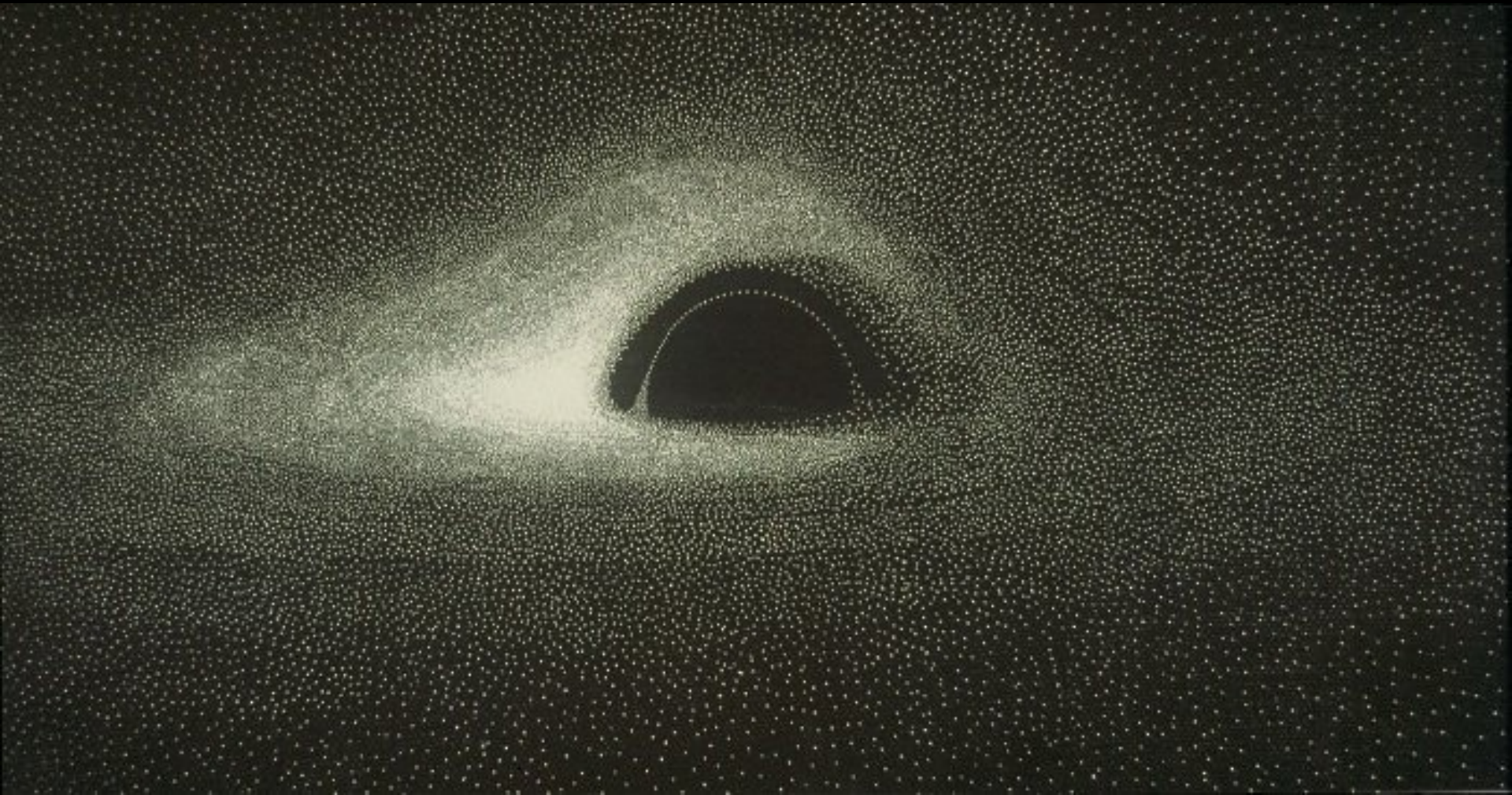
Effet Doppler

Ombre du trou noir

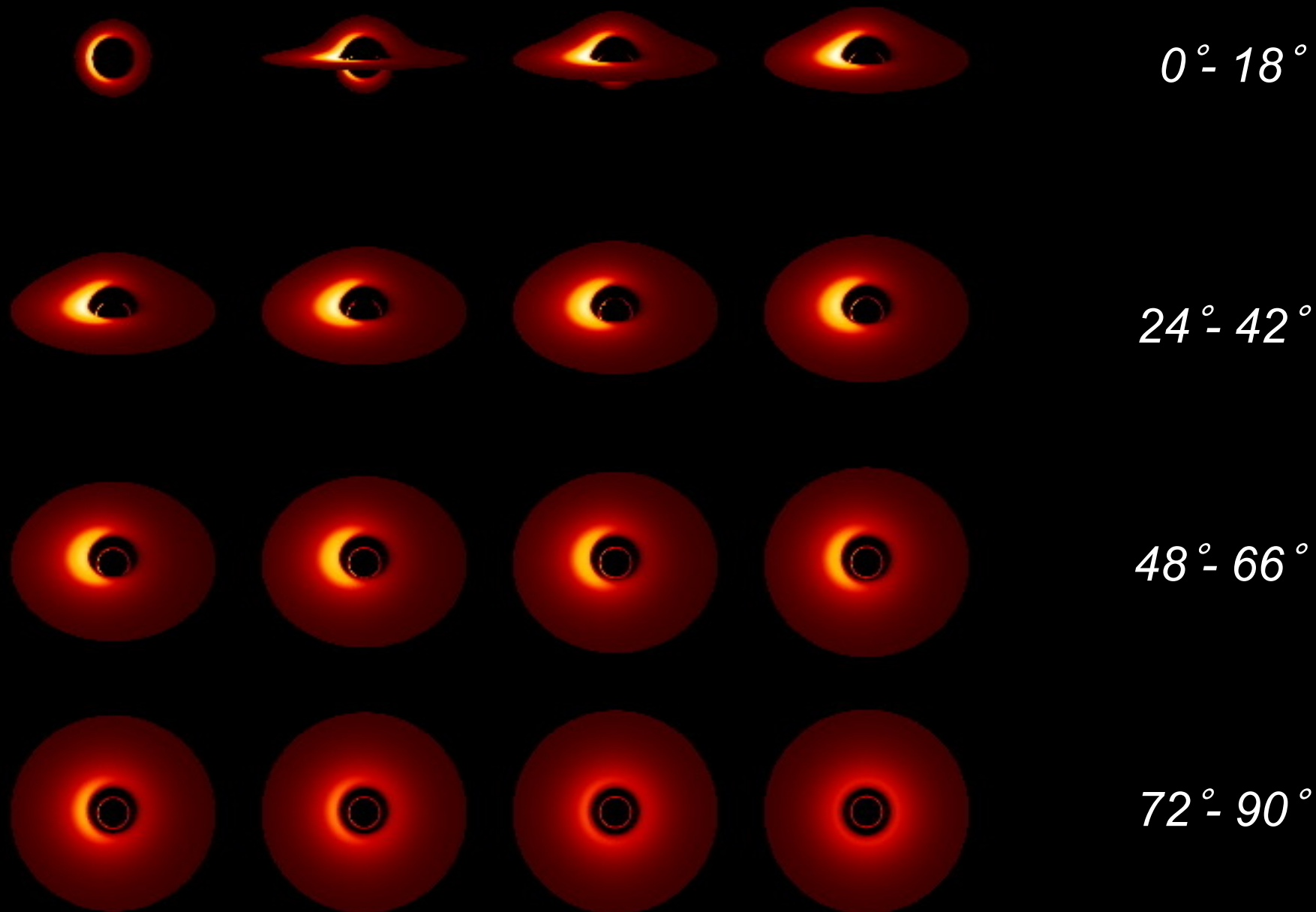
Image of a spherical black hole with thin accretion disk

J.-P. Luminet, *Astron.Astrophys.* **75**, 228 (1979)

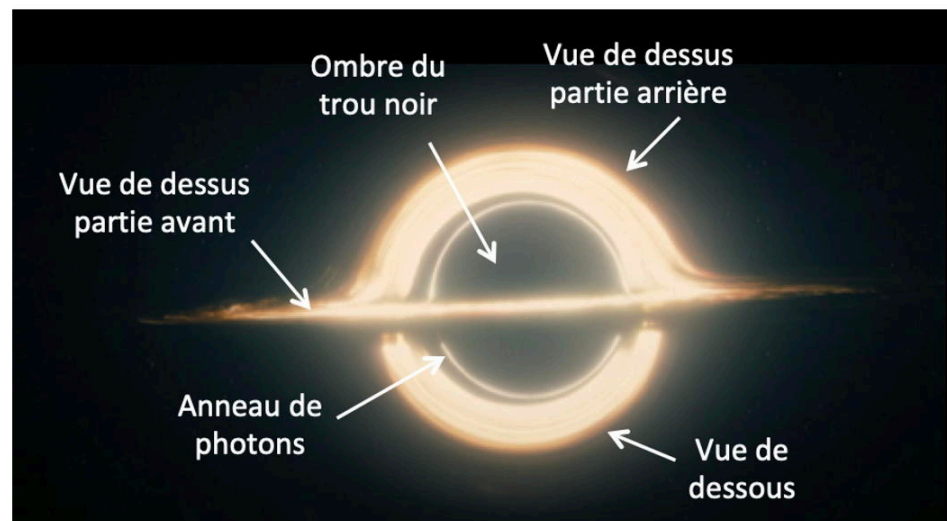
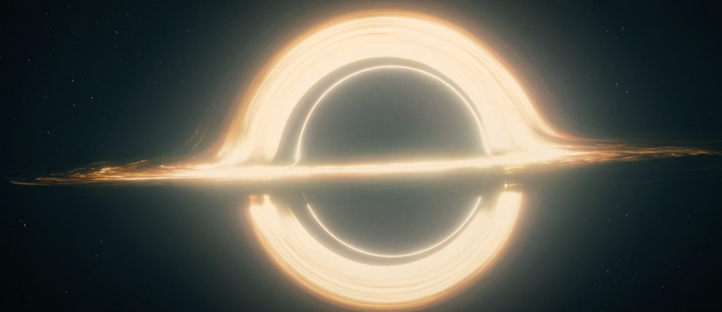
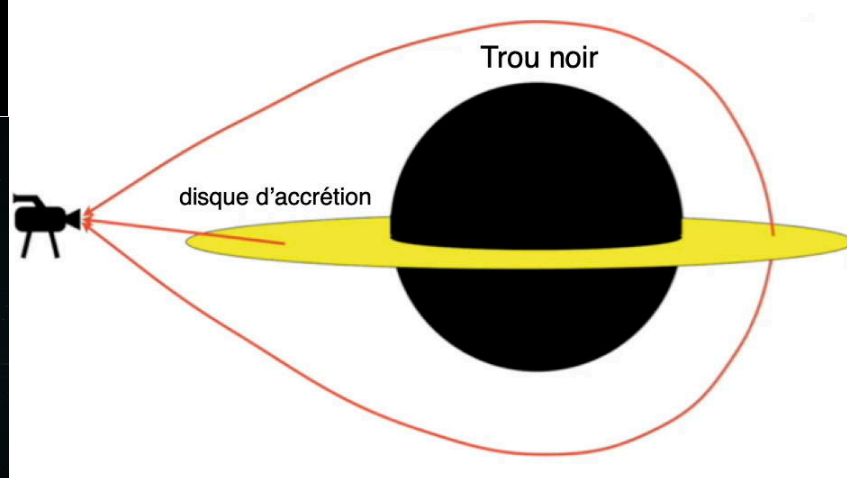
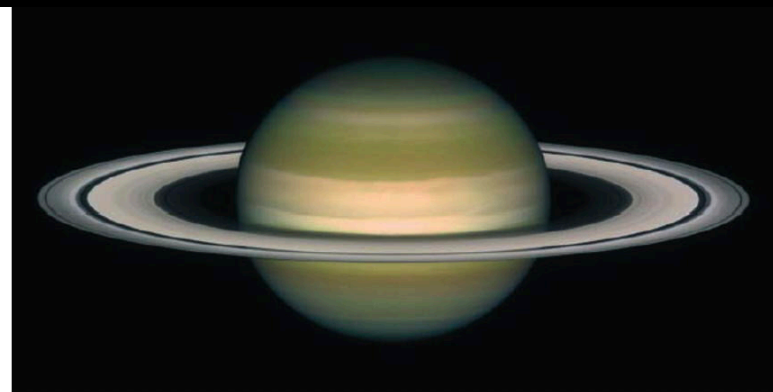
# A la main



# Premières images à tous angles de vue (JAM/JPL 1989)



Le disque d'accrétion  
autour de Gargantua  
est-il correct ?



10 Octobre 2014

Cher Jean Pierre,



Kip Thorne

*« Au cas où tu te poserais des questions sur le disque d'accrétion présenté dans les bandes-annonces du film Interstellar : le décalage Doppler n'a pas été pris en compte dans les images, car (comme tu l'as montré il y a longtemps) il rend le disque très asymétrique, et beaucoup plus difficile à comprendre pour le grand public.*

*(...)*

*Oui, je connais le très beau travail de Jean-Alain Marck. Je l'ai regardé à nouveau sur YouTube en début de semaine, et je l'ai admiré.*

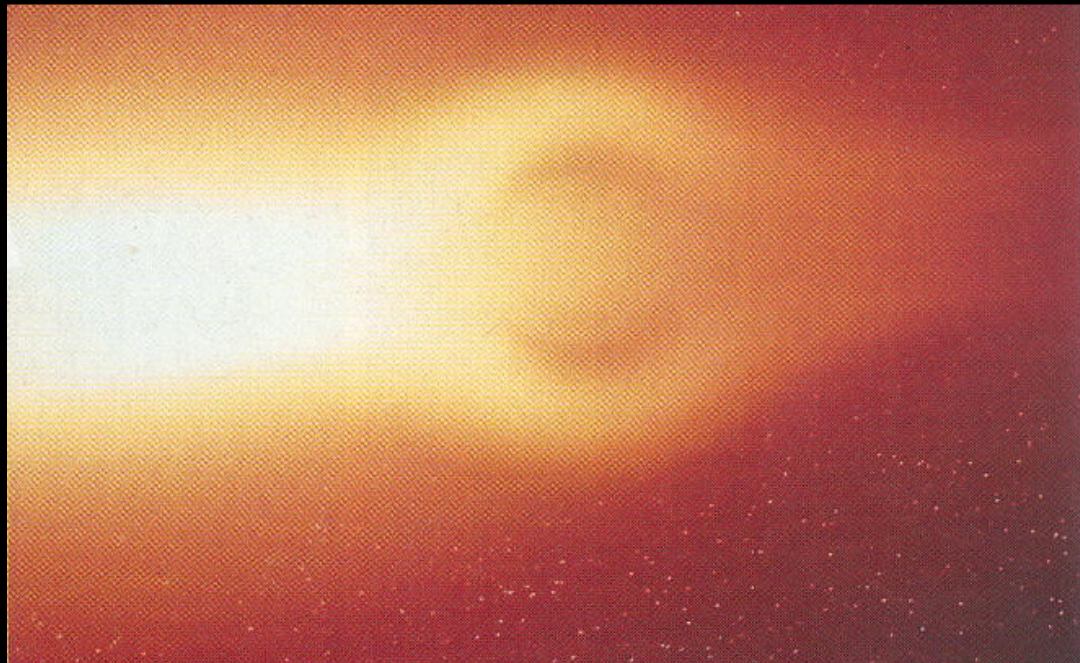
Thorne et al.

Movie Interstellar (2014)



J.-P. Luminet & J.-A. Marck

Pour la Science (1997)



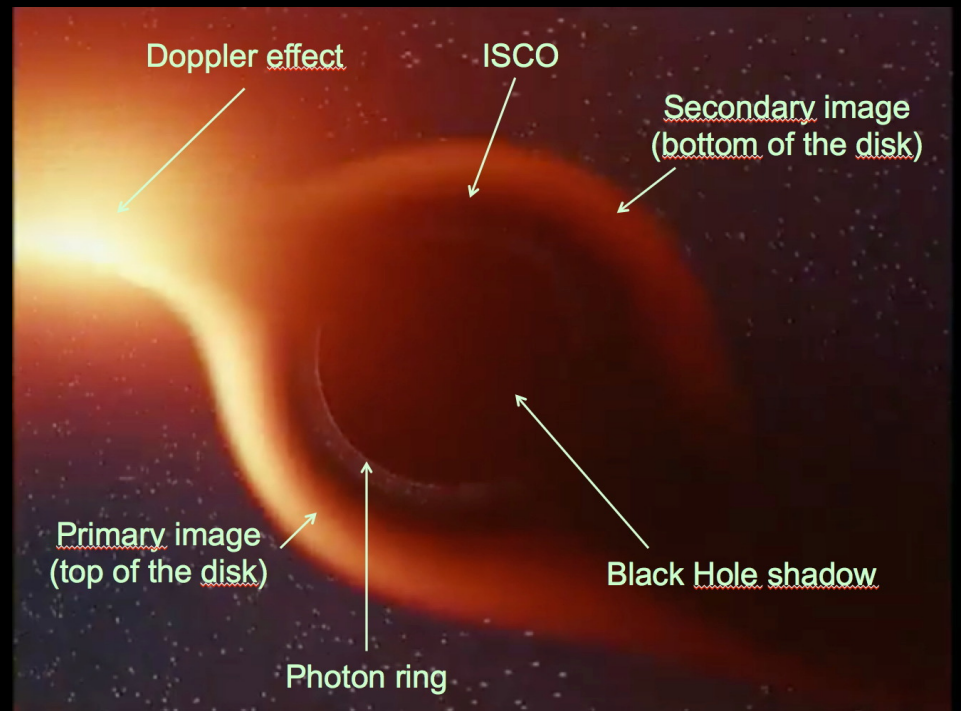
Thorne et al.

Movie Interstellar (2014)



J.-P. Luminet & J.-A. Marck

Pour la Science (1997)



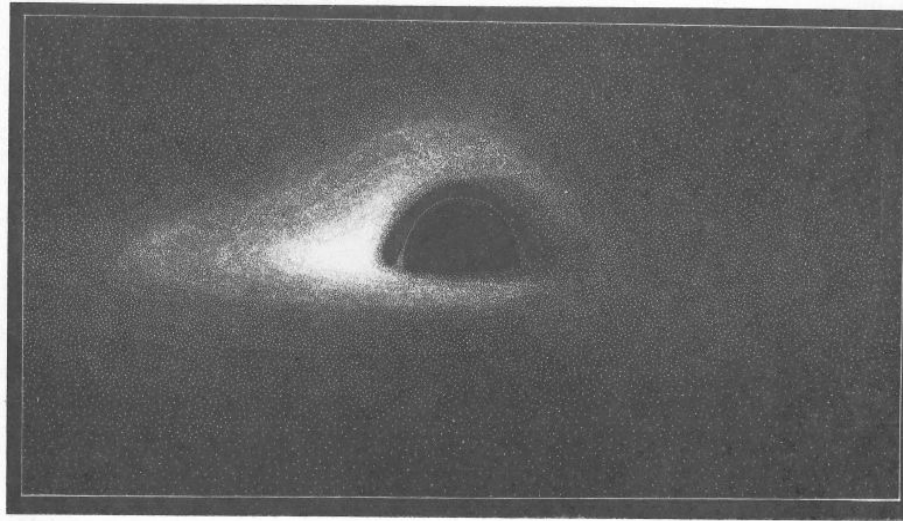


Fig. 11. Simulated photograph of a spherical black hole with thin accretion disk

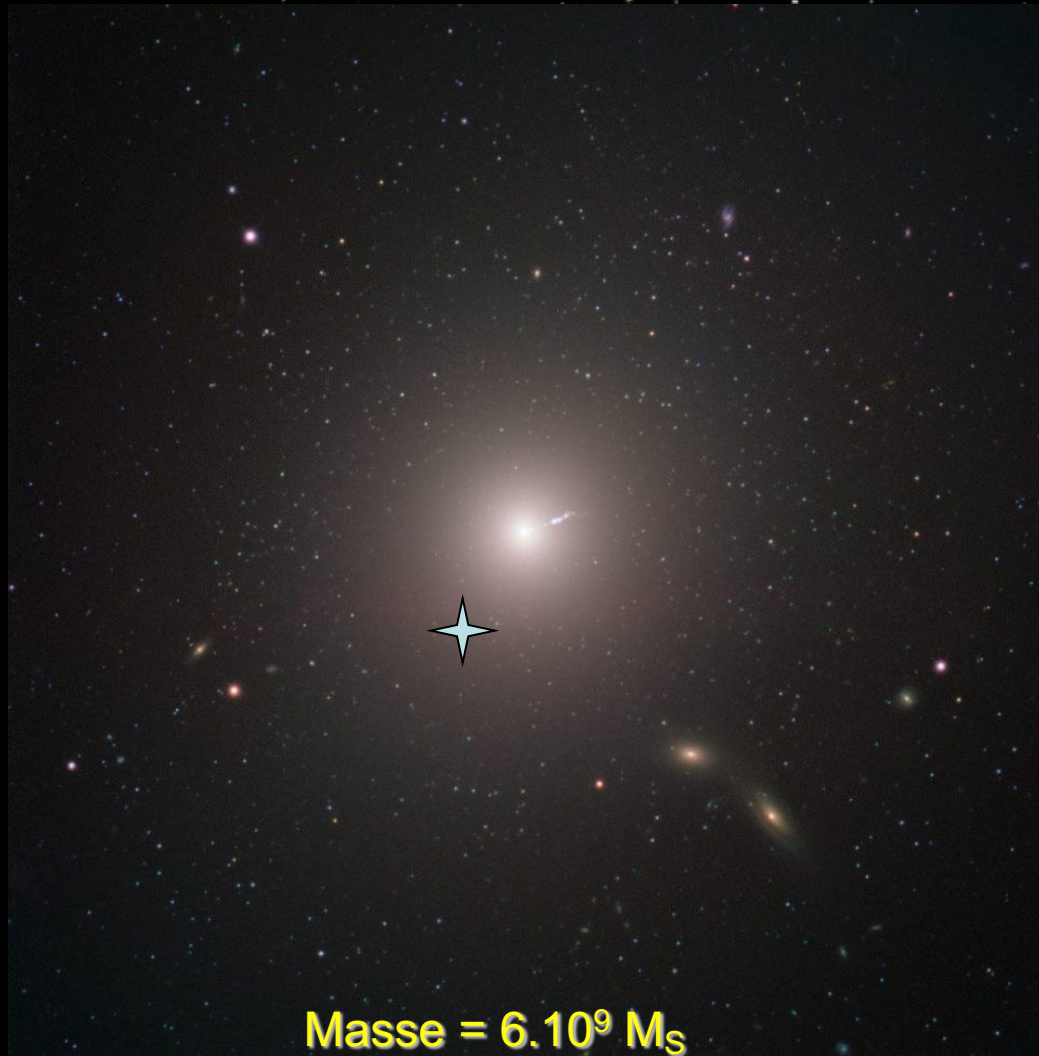
The results are taken into account in Fig. 11, which represents the final result of this paper, namely a simulated “bolometric photography” of a static black hole with thin accretion disk.

Figures 9–11 are valid for a large number of black hole situations, i. e. black holes with any mass accreting matter at any rate sufficiently far below the Eddington limit. Thus our picture could represent many relatively weak sources, such as for instance the supermassive black hole whose existence in the nucleus of M 87 has been suggested recently by Young et al. (1978).

*Acknowledgements.* I am greatly indebted to B. Carter for help and encouragement; I am grateful to J. Diaz Alonso and N. Sanchez for fruitful discussions.

- INCIVIKOV, I. D., IBOHIC, K. S.: 1975, in *Black Holes*, Les Houches, ed. DeWitt and DeWitt, Gordon and Breach, New York
- Page, D. N., Thorne, K. S.: 1974, *Astrophys. J.* **191**, 499
- Prendergast, K. H., Burbidge, G. R.: 1968, *Astrophys. J. Letters* **151**, L 83
- Pringle, J. E., Rees, M. J.: 1972, *Astron. Astrophys.* **21**, 1
- Pineault, S., Roeder, R. C.: 1977, *Astrophys. J.* **212**, 541
- Shakura, N. I., Sunyaev, R. A.: 1973, *Astron. Astrophys.* **24**, 337
- Sanchez, N.: 1977, *Phys. Rev.* **D16**, 937; 1978, to appear
- Young, P. J., Westphal, J. A., Kristian, J., Wilson, C. P., Landauer, F. P.: 1978, *Astrophys. J.* **221**, 721

# Le Trou noir M87\*



Masse =  $6 \cdot 10^9 M_{\odot}$   
Diamètre = 40 milliards Km

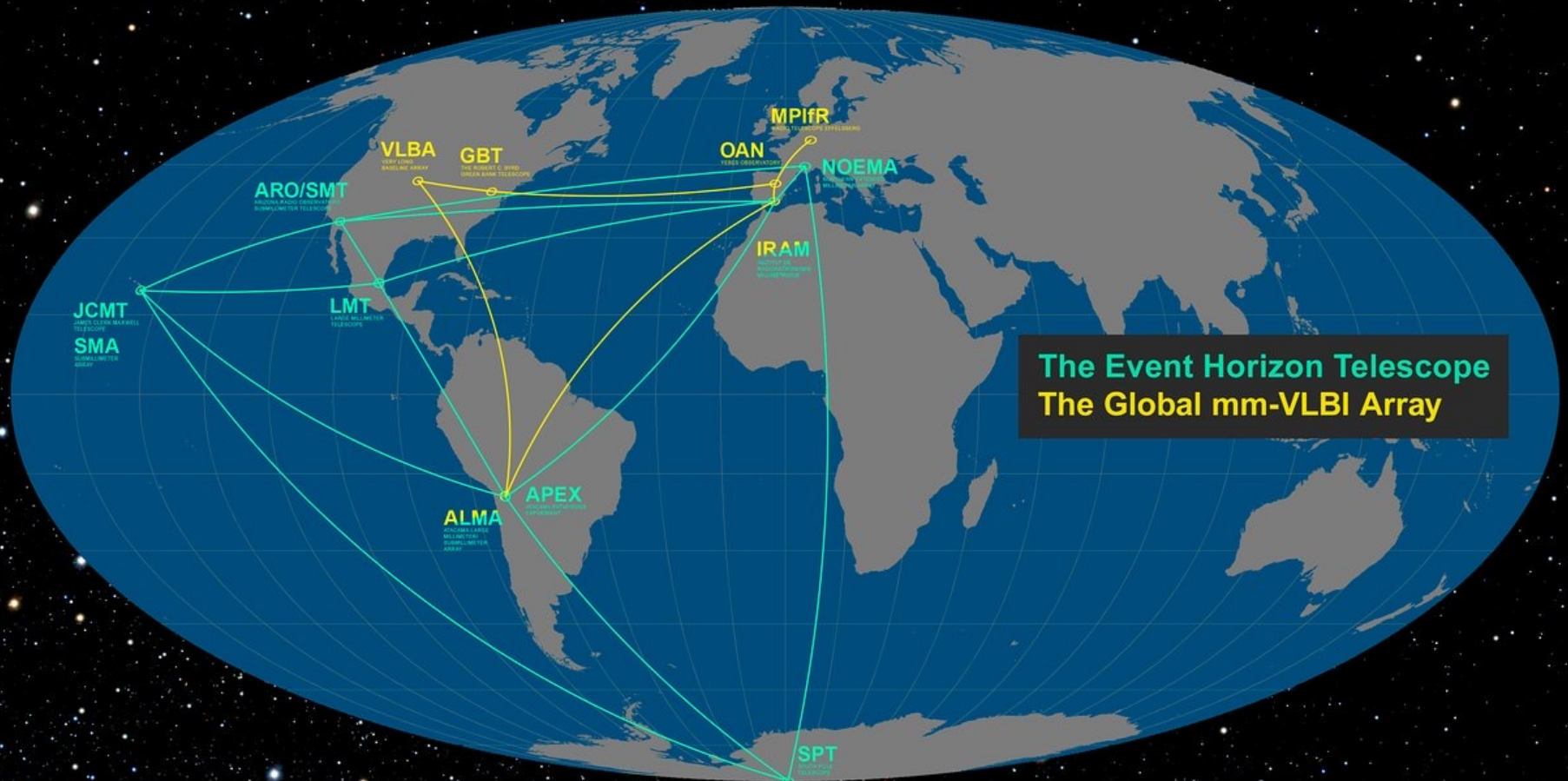
# Le Trou noir Galactique SgrA\*



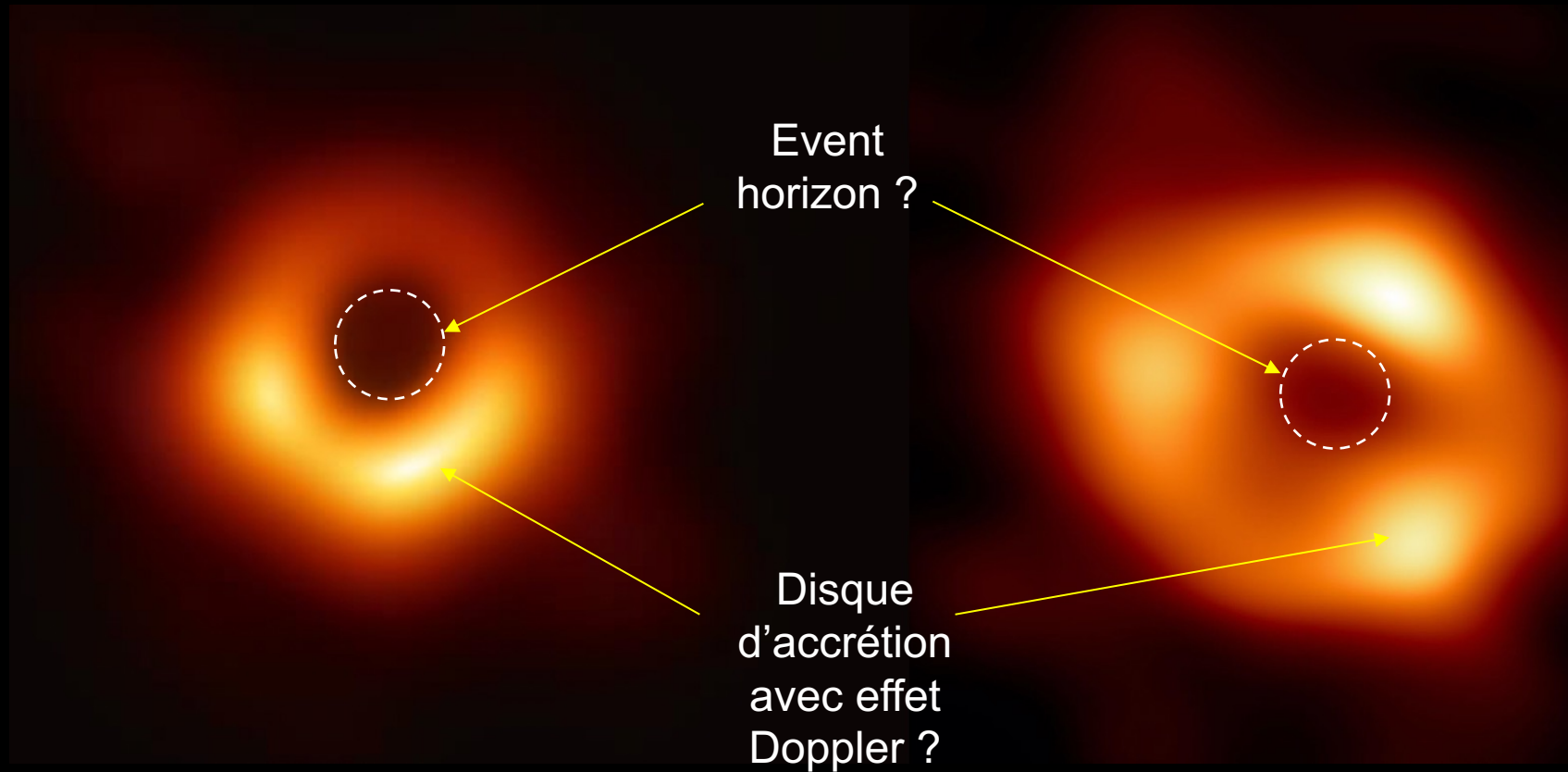
Masse =  $4 \cdot 10^6 M_{\odot}$   
Diamètre = 25 millions Km

# → Event Horizon Telescope (EHT) Consortium

*(Doeleman et al., 2008)*



# Premières « images télescopiques » de trous noirs par l'EHT



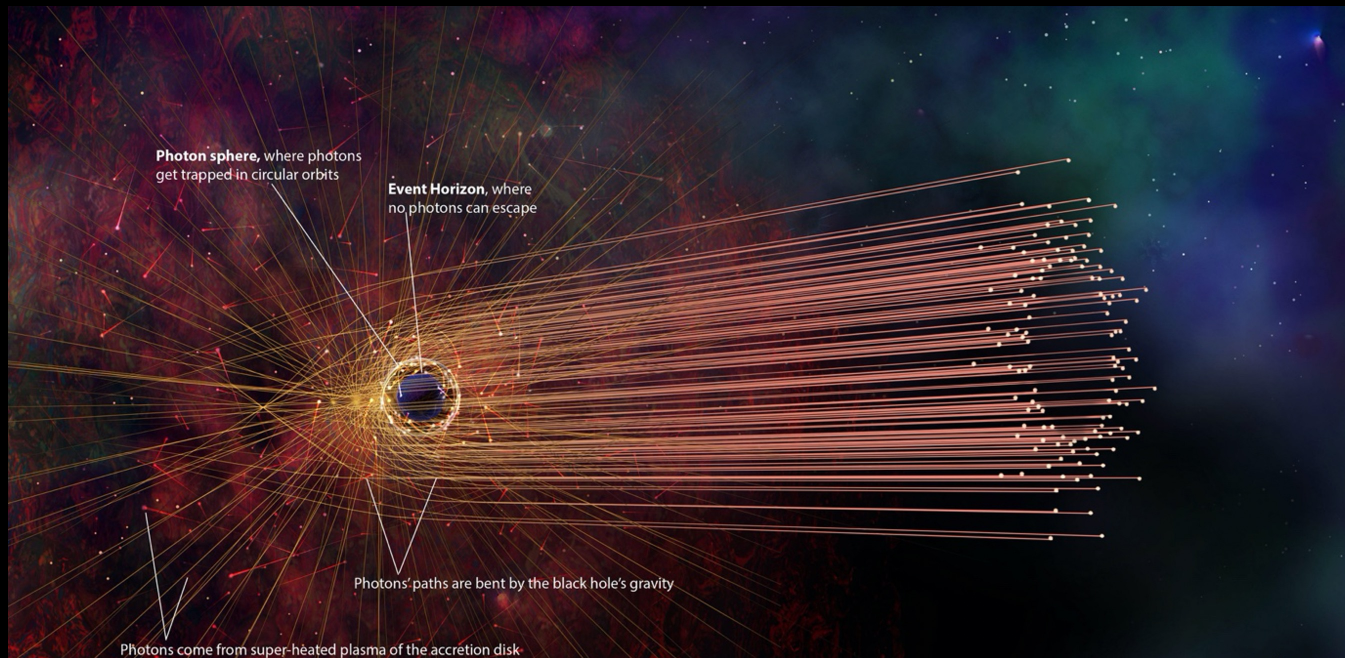
M87\*: 10 avril 2019

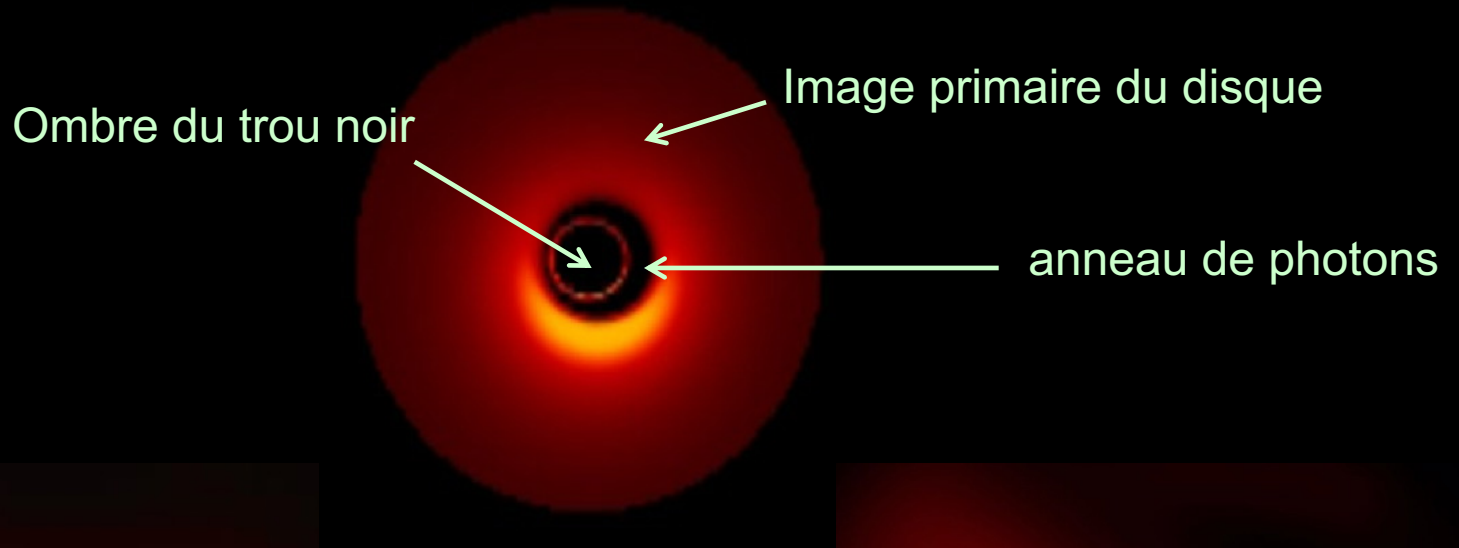
SgrA\*: 12 mai 2022

# Problème...

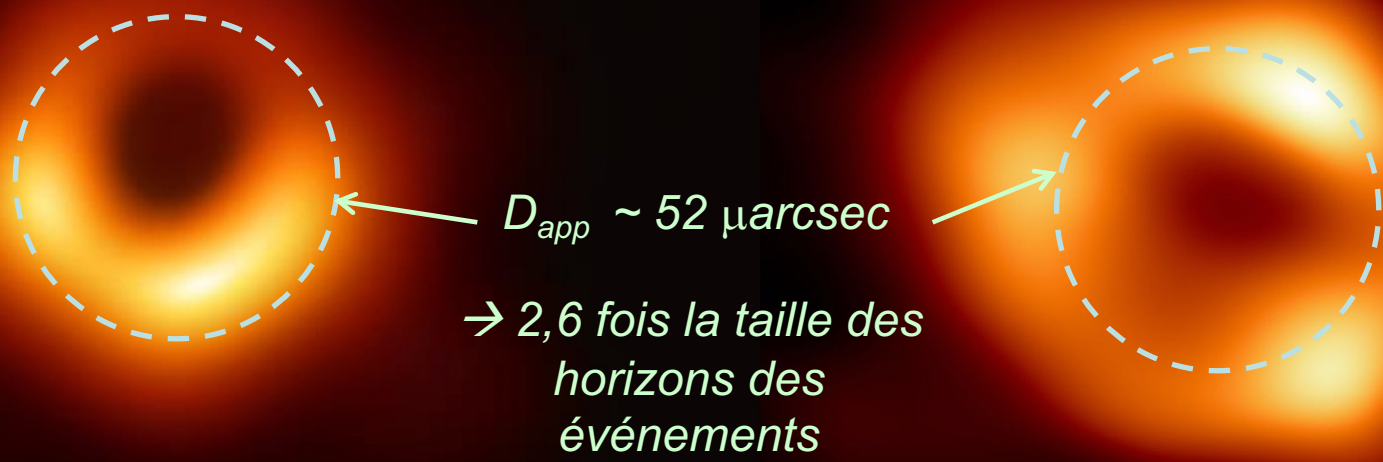
L'Image EHT est monochromatique ( $\lambda = 1.3 \text{ mm}$ )

→ A cette longueur d'onde les disques d'accrétion émettent peu, la luminosité est dominée par l'anneau de photons !





Angle de vue  $\sim 70^\circ$

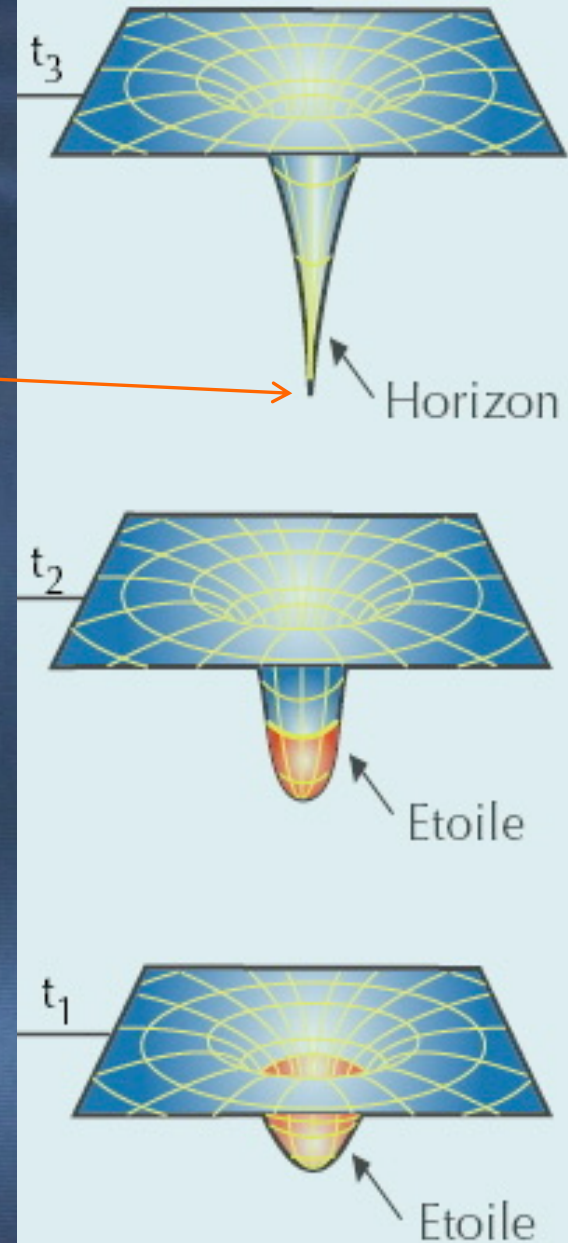
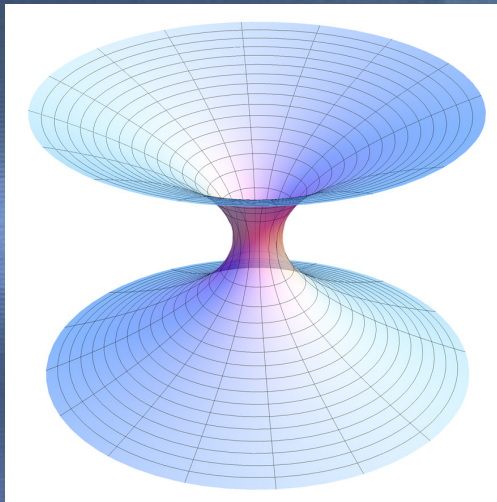


À la résolution de l'EHT, l'image du disque est superposée à l'anneau de photons

# Qu'y a-t-il au fond ?

Singularité ?

Pont d'Einstein-Rosen ?

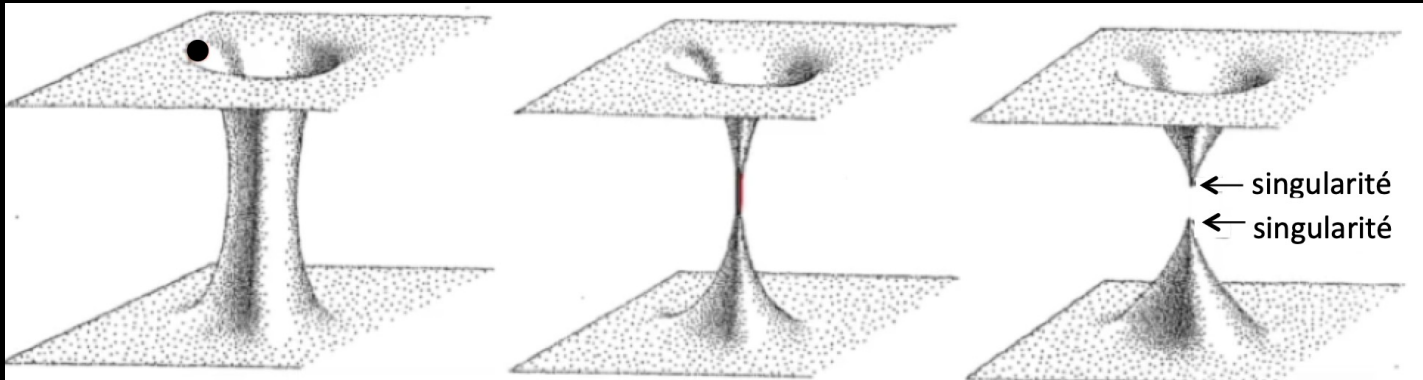


# L'hypothèse « trou de ver »

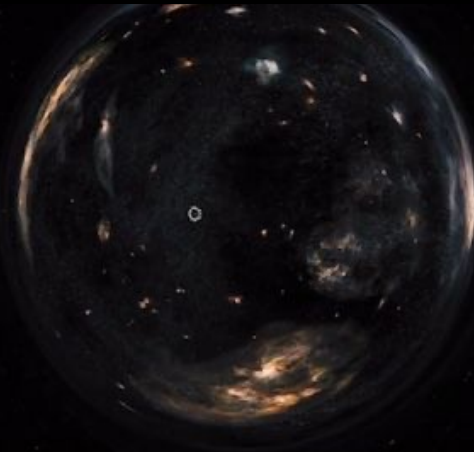




# Les trous de ver sont-ils traversables ?



Autodestruction d'un trou de ver naturel



Trou de ver artificiel



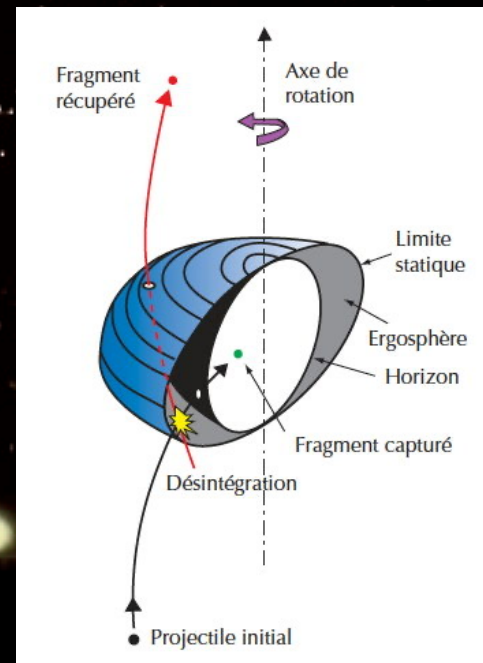


# Plonger dans le trou noir (1)

Assistance  
gravitationnelle



Processus de  
Penrose

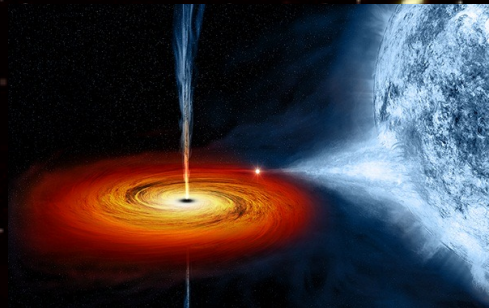


# Plonger dans le trou noir (2)

Survoler le disque  
d'accrétion



Températures  
typiques :  $10^6$ - $10^8$  K

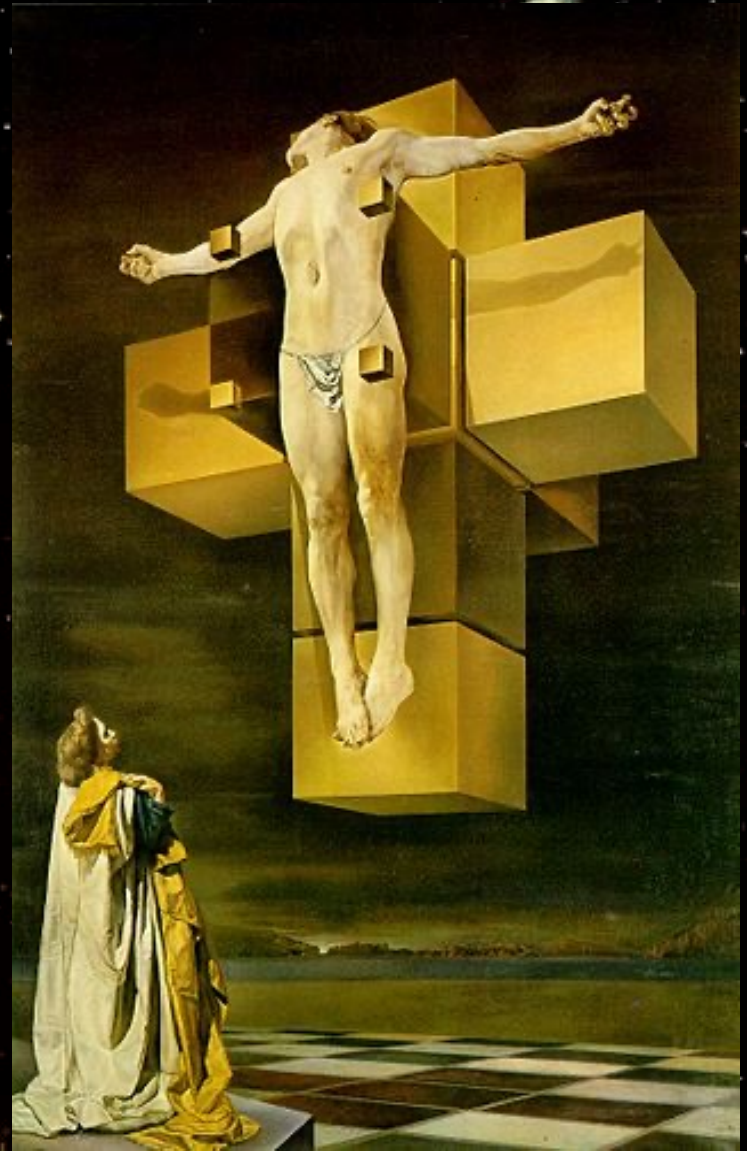
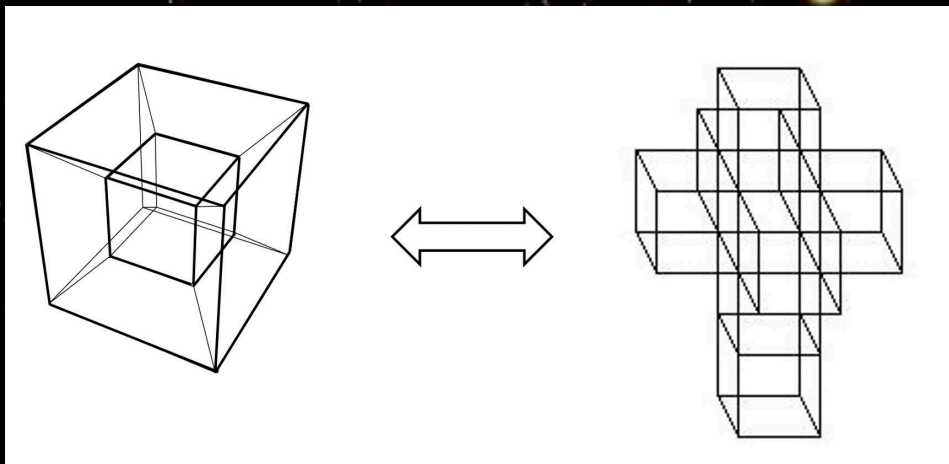
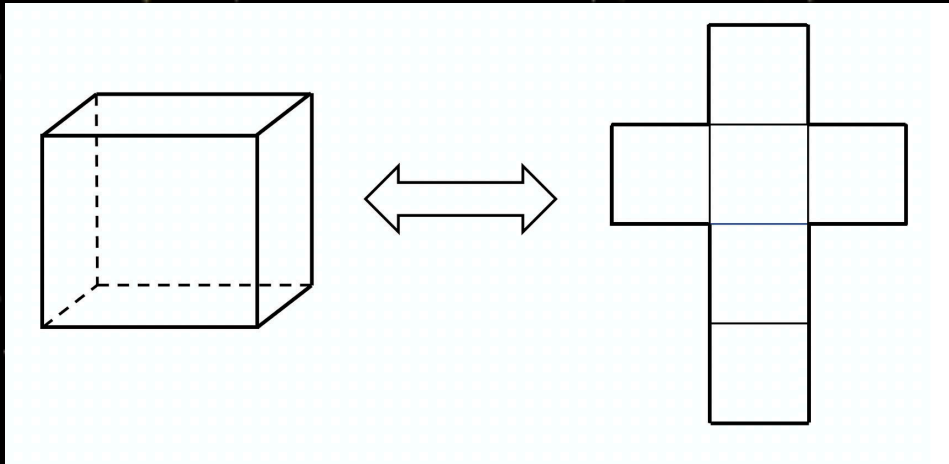


→ Disque « anémique » à 5500 K

# Plonger dans le trou noir (3)

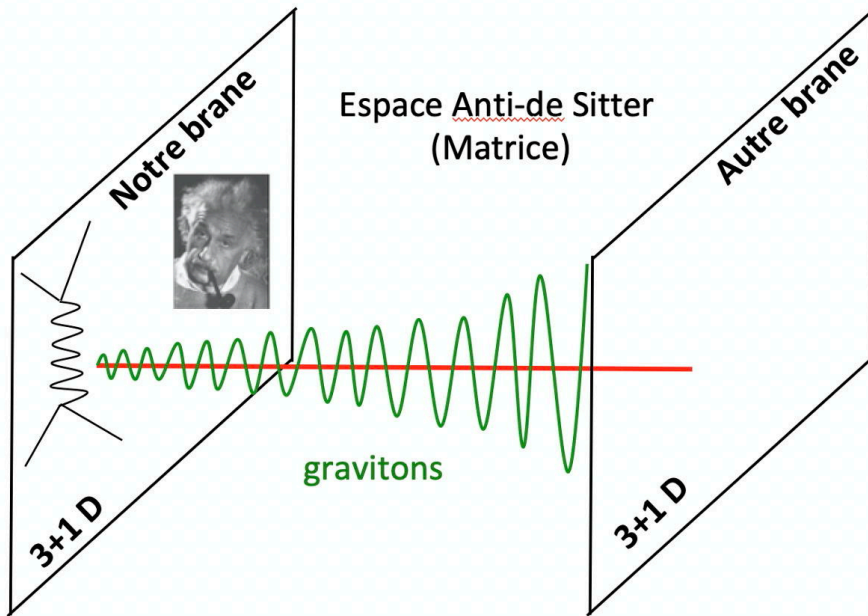


# Le « Tesseract » ou Hypercube



*Dali : Crucifixion (Corpus Hypercubus)*

# Modèle de Randall- Sundrum



MY EQUATION  
for the Effective Action  $S(\lambda, \xi, Q, \dots)$

$$S = \int \sqrt{-g_5} d^5x \left\{ \mathcal{L}_{\text{bulk}} + \sum_{\substack{\text{branes} \\ a=0,1,2}} \delta(\sigma(x^4) - \sigma_a) \mathcal{L}_{\text{brane}}^a \right\}$$

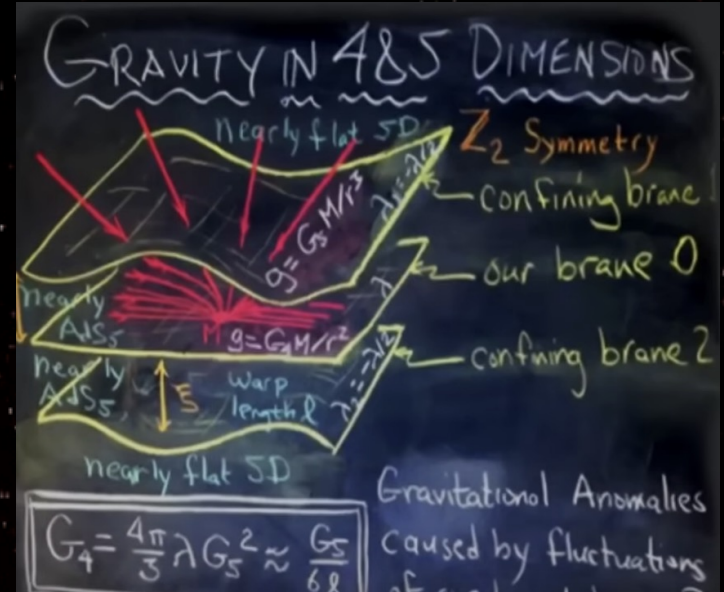
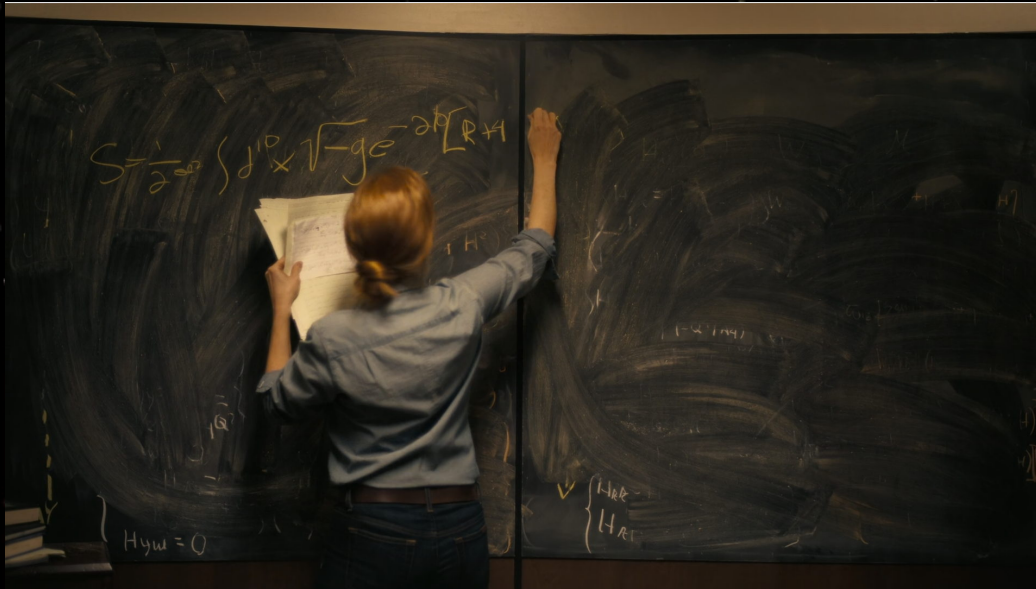
↑ brane location

Where!

$$\mathcal{L}_{\text{bulk}} = \frac{1}{16\pi G_5} (R_5 - 2\Lambda_5) - \frac{1}{2} \nabla_\alpha Q \nabla^\alpha Q - \frac{1}{2} U(Q) - \frac{1}{2} \sum_{\substack{\text{auxiliary} \\ \text{fields } i,j}} H_{ij}(Q^2) \nabla_\alpha \Phi^i \nabla^\alpha \Phi^j$$

$$\mathcal{L}_{\text{brane}}^0 = \frac{K}{16\pi G_5} + \frac{1}{2} (Q^2 - \lambda) \nabla_\mu \xi \nabla^\mu \xi + \frac{1}{2} \nabla_\mu \lambda \nabla^\mu \lambda + \frac{1}{2} \sum_{i,j} W_{ij} \Phi^i \Phi^j \mathcal{M}(\text{standard model fields}) + \frac{1}{2} V(\sqrt{[\xi - \xi_0(Q^2)]^2 + [\lambda - \lambda_0(Q^2)]^2}) + (\text{Standard Model Terms})$$

# Une équation ultime ?

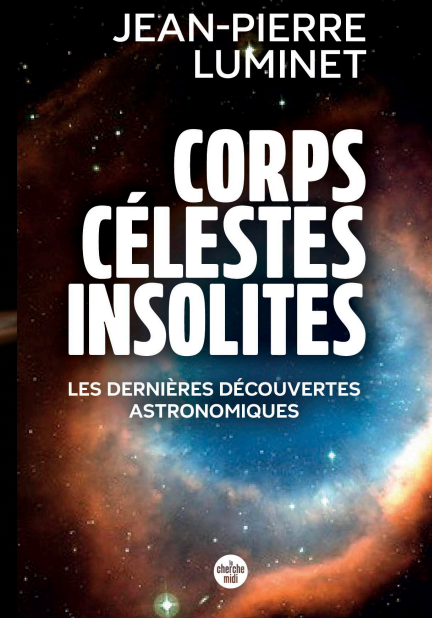
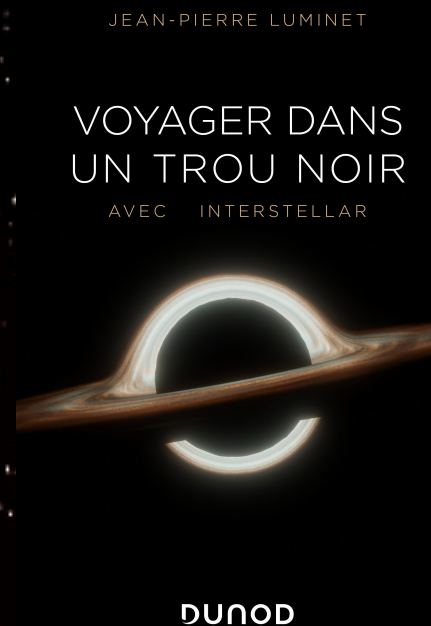
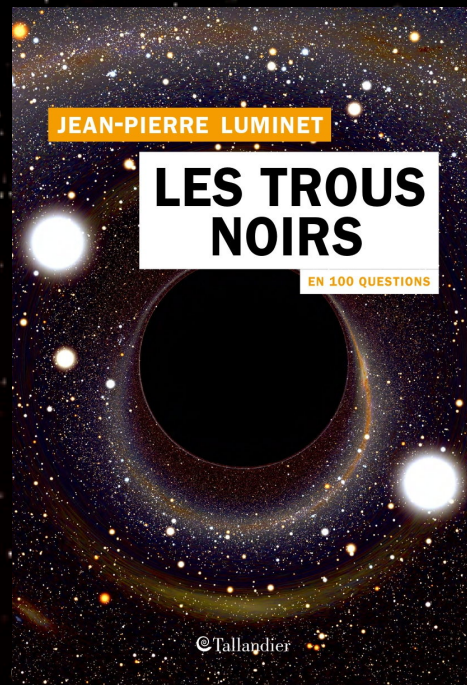
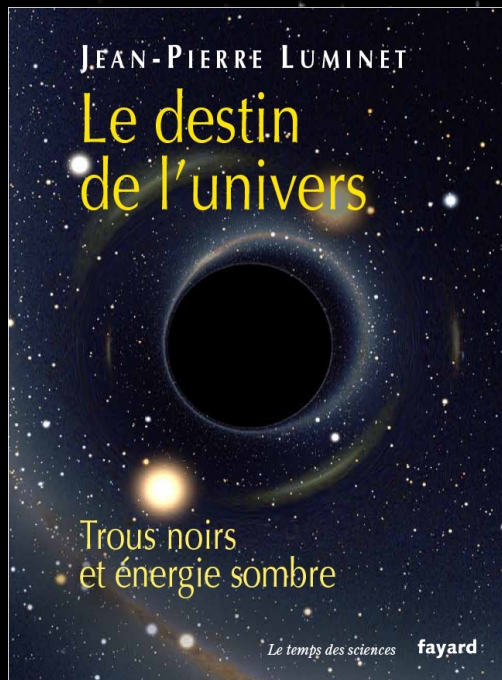


$$G_4 = \frac{4\pi}{3} \lambda G_5^2 \approx \frac{G_5}{6\ell}$$

L'humanité est sauvée !



# Pour en savoir plus sur les trous noirs



Merci !

On t'entend pas J-P,  
ça coupe !



*Jules*