

Projet tuteuré en laboratoire
L3 Physique

LES TROUS NOIRS EN ASTROPHYSIQUE

Elisa Denis

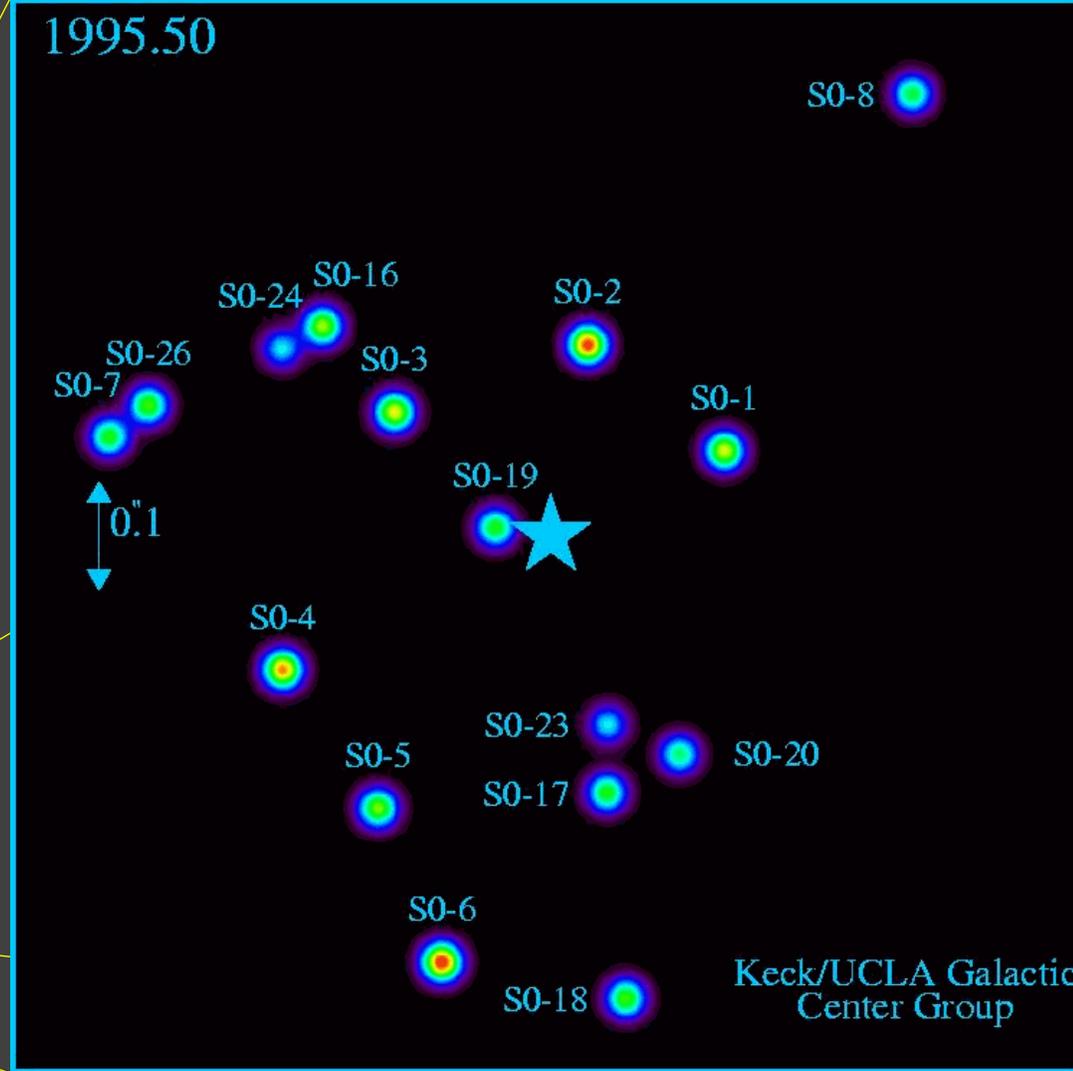
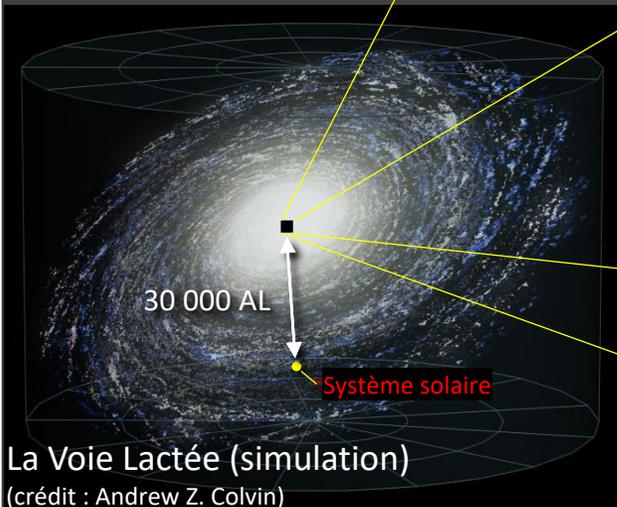
Yohan Berger

François-Xavier Gauci

Tuteur: Bertrand Chauvineau
Observatoire de la Côte d'Azur / UMR Lagrange

5 juin 2020

Animation des orbites décrites par les étoiles dans la région centrale de la Voie Lactée



- étoile bleue = centre de force invisible
- S0-n = étoiles
- échelle : 0,1" arc ---> 850 UA

Le mouvement des étoiles donne la masse approximative de l'astre central :

$$M = 4,3 \cdot 10^6 M_{\odot}$$

→ très probablement un **Trou Noir**

Théorie de Newton versus Théorie d'Einstein

Mécanique Newtonienne	Mécanique relativiste
Le temps est absolu	Le temps est relatif à l'observateur
Une vitesse peut augmenter indéfiniment	La vitesse de la lumière dans le vide est une vitesse limite et est indépendante de l'observateur

Gravitation Newtonienne	Gravitation relativiste (Relativité Générale = RG)
Force \rightleftarrows mouvement non inertiel	Métrique de l'espace-temps $\rightleftarrows ds^2 = g_{ab}dx^a dx^b$
Transmise instantanément	Propagation à la vitesse de la lumière
$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \frac{-GM}{r^3}\vec{r} \rightleftarrows$ Orbites Képlériennes	$R_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4}(T_{ab} - \frac{1}{2}Tg_{ab}) \rightleftarrows$ Géodésiques
Orbites circulaires pour tout r	Orbites circulaires uniquement si $r \geq 3M$
Ambiguïté de la théorie concernant les effets sur la lumière	Un photon suit une géodésique de « longueur » nulle ($ds^2 = 0$)



Symétrie sphérique : la solution de Schwarzschild-De Sitter

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2M}{r} - \frac{\Lambda r^2}{3} \right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r} - \frac{\Lambda r^2}{3} \right)^{-1} dr^2 + r^2 \underbrace{(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)}_{\text{Symétrie sphérique}}$$

- Λ est la constante cosmologique
- On a posé $G = c = 1$ (unités relativistes)
- Solution générale de la RG dans le vide à symétrie sphérique
- $\Lambda = 0 \rightarrow$ **métrie de Schwarzschild**

Equation de Binet relativiste

$$\frac{d^2}{d\phi^2} \left(\frac{1}{r} \right) + \frac{1}{r} = \frac{M}{K^2} + \frac{3M}{r^2} \quad \left(K = r^2 \frac{d\phi}{d\tau}, \text{ constante des aires relativiste} \right)$$

- Pour $K = \infty \rightarrow$ cas « lumière »

Horizon du TN $r = 2M$

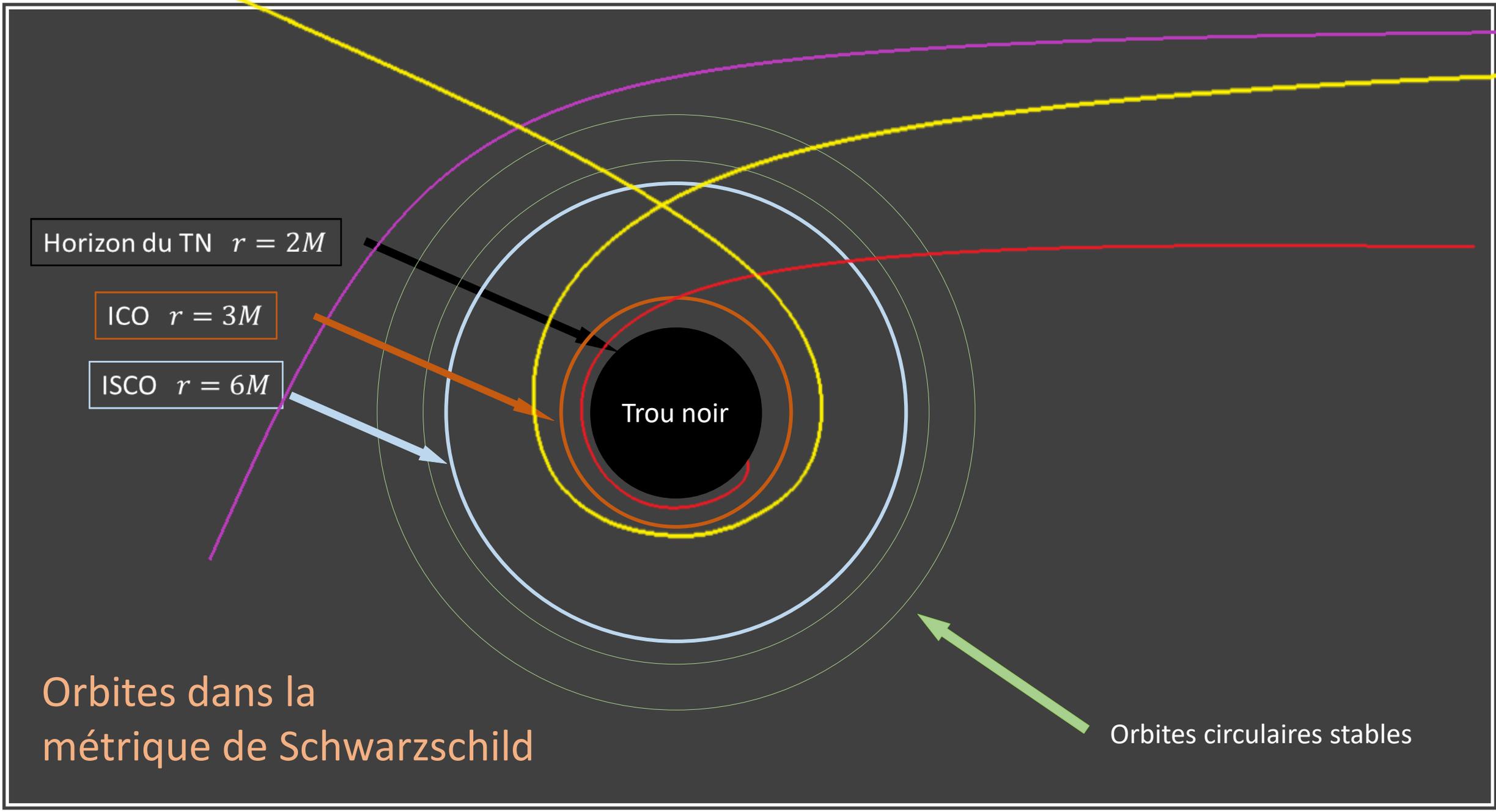
ICO $r = 3M$

ISCO $r = 6M$

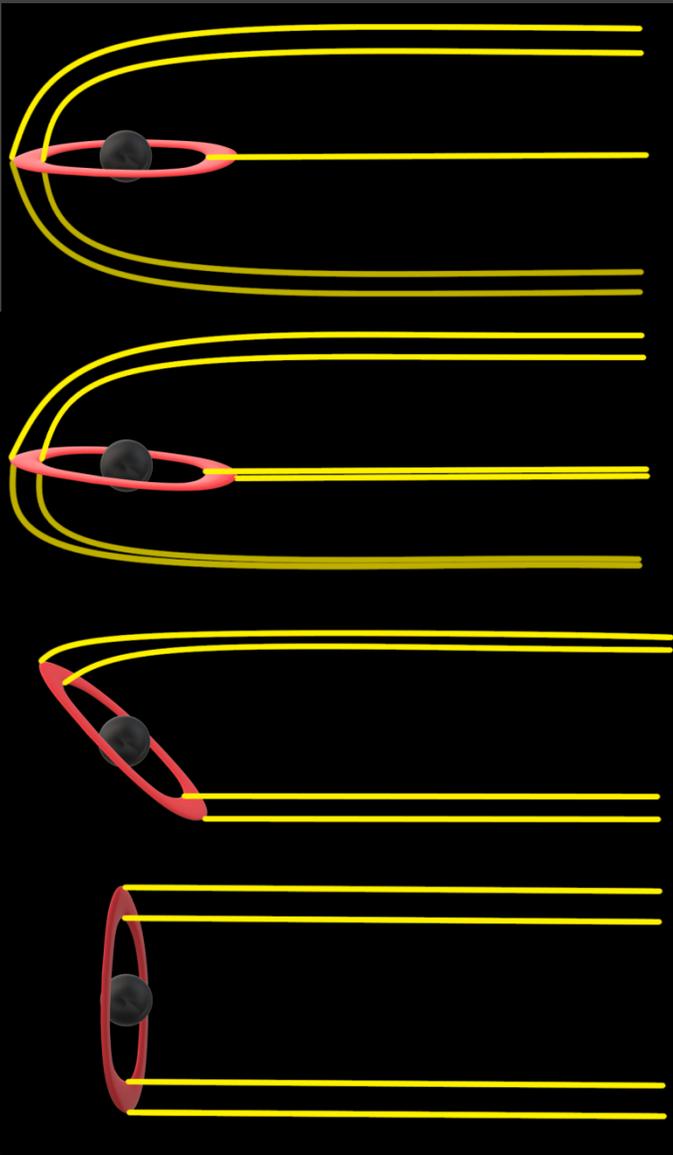
Trou noir

Orbites dans la
métrique de Schwarzschild

Orbites circulaires stables



Quelle est l'image produite par un disque d'accrétion ?



Observation dans le plan du disque
d'accrétion (inclinaison de 90°)



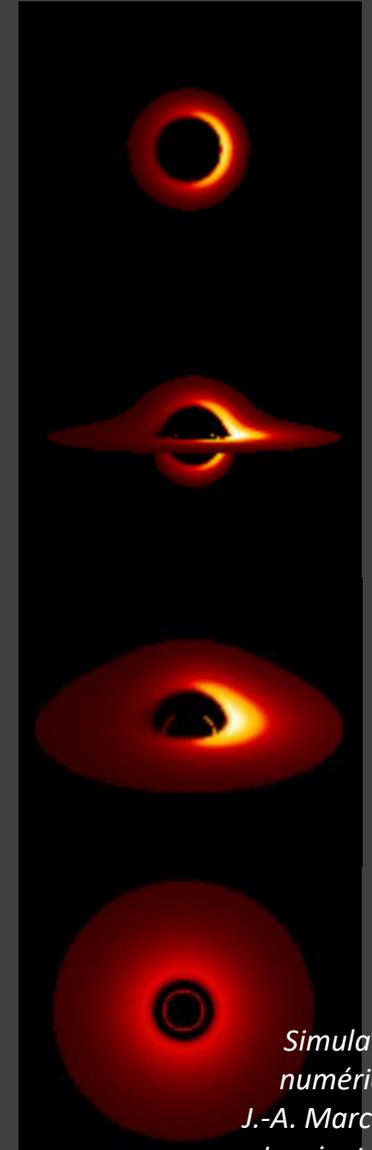
Observation avec une inclinaison
proche de 90° par rapport au disque
d'accrétion



Observation avec une inclinaison
de 45°



Observation dans la direction
normale au disque d'accrétion
(inclinaison de 0°)



*Simulations
numériques,
J.-A. Marck et J.-P.
Luminet (1989)*

M87* : un cas concret d'observation

Amas de la Vierge,

Royal Observatory
Edinburgh/Anglo-Australian
Observatory

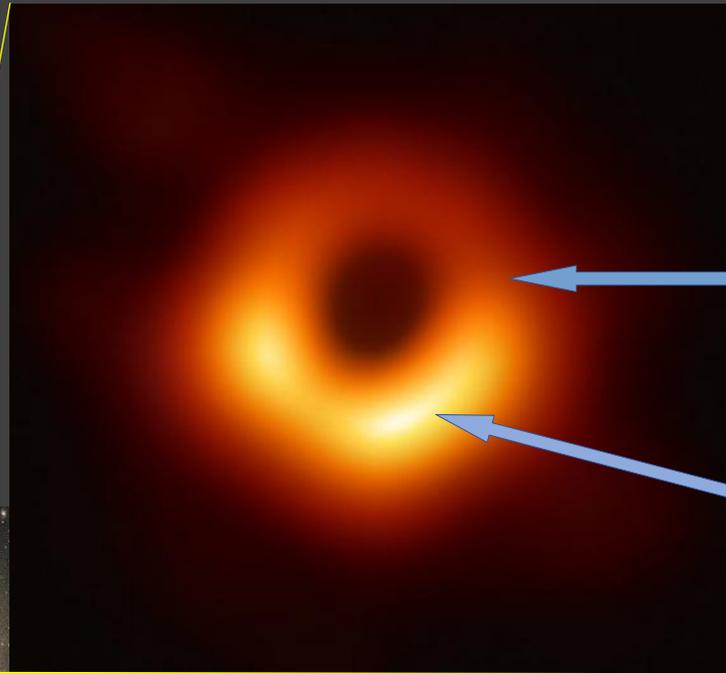
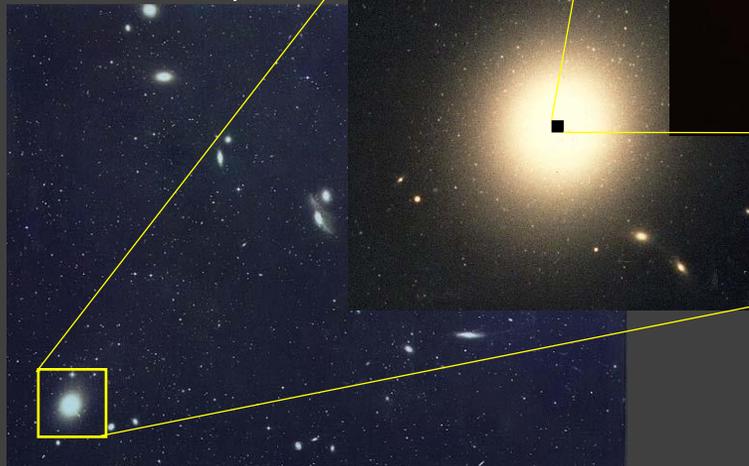
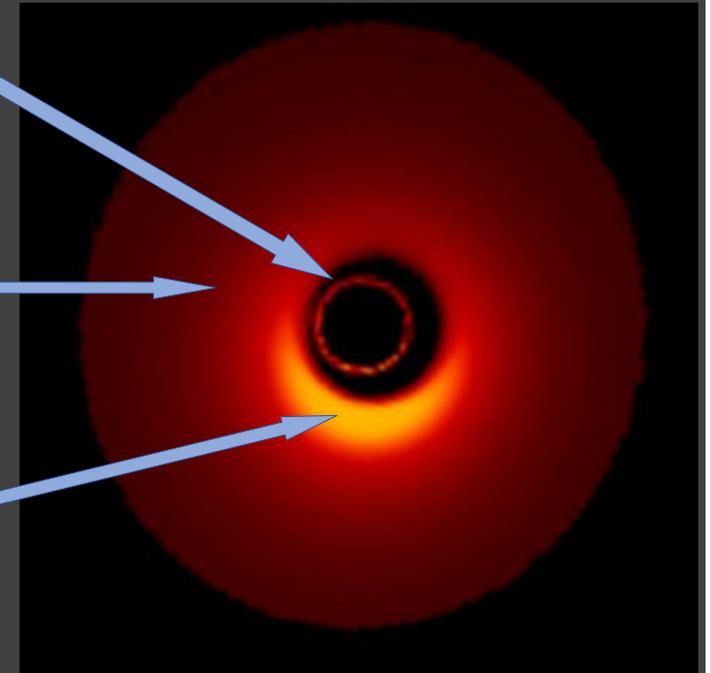


Image de M87*,
Event Horizon Telescope
(2019)

Orbite
photonique

Image directe
du disque
d'accrétion

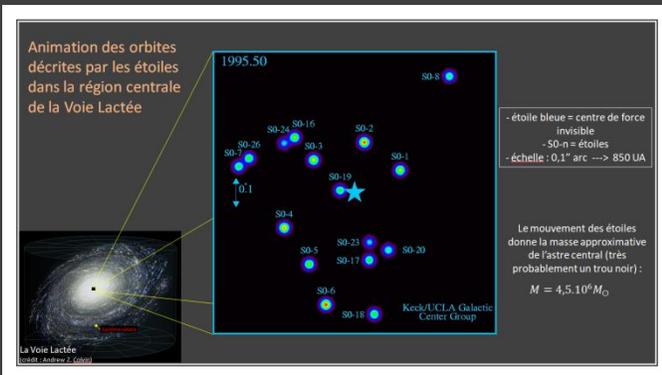
Composante
radiale de la
vitesse vers
l'observateur



Simulation numérique,
J.-A. Marck et J.-P. Luminet (1989)

Temps d'échange

2



1

Théorie de Newton versus Théorie d'Einstein

Mécanique Newtonienne	Mécanique relativiste
Le temps est absolu	Le temps est relatif à l'observateur
Une vitesse peut augmenter indéfiniment	La vitesse de la lumière dans le vide est une vitesse limite et est indépendante de l'observateur
Gravitation Newtonienne	Gravitation relativiste
Force \iff mouvement non inertiel	Métrie de l'espace-temps $\iff ds^2 = g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu}$
Transmise instantanément	Propagation à la vitesse de la lumière
$\frac{d^2 r}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3} r \iff$ Orbits képlériennes	$R_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} (T_{ab} - \frac{1}{2} T g_{ab}) \iff$ Géodésiques
Orbits circulaires pour tout r	Orbits circulaires uniquement si $r \geq 3M$
Ambiguïté de la théorie concernant les effets sur la lumière	Les photons suivent une géodésique de « longueur » nulle ($ds^2 = 0$)

source : www.eso.org

La métrique de Schwarzschild-De Sitter (Λ = constante cosmologique)

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2M}{r} - \frac{\Lambda r^2}{3}\right) dt^2 + \left(1 - \frac{2M}{r} - \frac{\Lambda r^2}{3}\right)^{-1} dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$

- Λ est la constante cosmologique
- On a posé $G = c = 1$ (unités relativistes)
- $\Lambda = 0 \rightarrow$ métrique de Schwarzschild

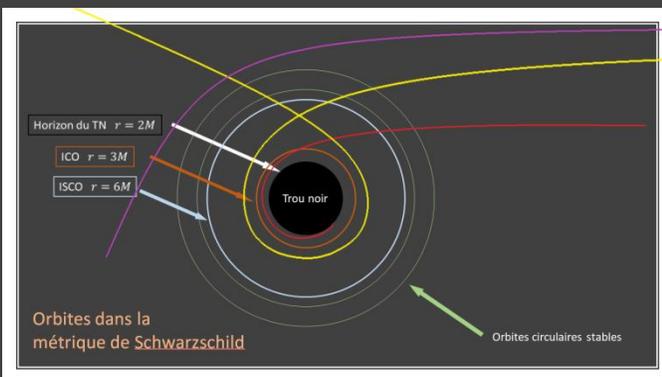
Solution générale dans le vide à symétrie sphérique

Equation de Binet avec correction relativiste

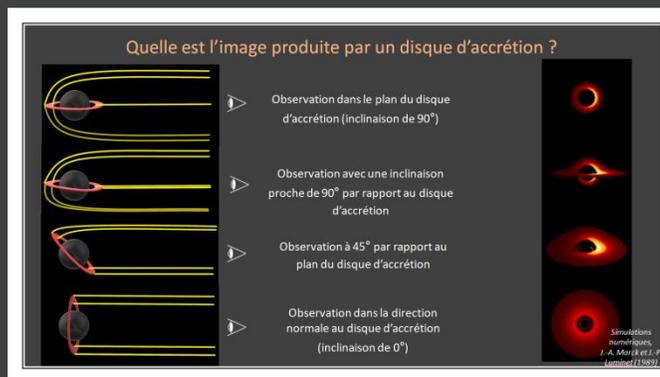
$$\frac{d^2}{d\phi^2} \left(\frac{1}{r}\right) + \frac{1}{r} = \frac{M}{K^2} + \frac{3M}{r^3}$$

- Pour $K = \infty \rightarrow$ cas « lumière »

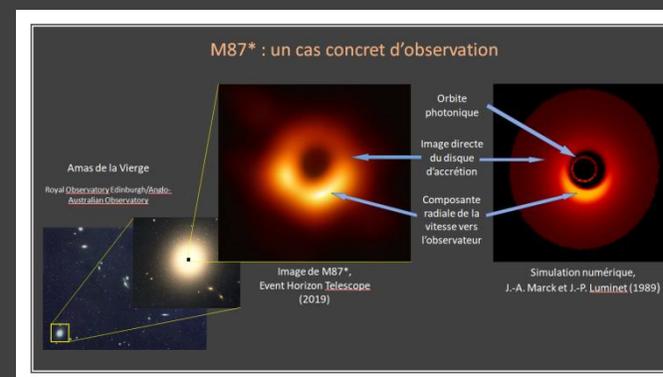
3



4



5



6

Bibliographie

- B. Chauvineau, Licence 3 Physique Option Gravitation, Introduction à la Relativité Générale (2019)
- A.C. Fabian et A.N. Lasenby, General Relativity : The most beautiful of theories: Applications and trends after 100 years, Carlo Rovelli (2015) ; *Astrophysical Black Holes*, arXiv:1911.04305v1 (2019)
- The Event Horizon Telescope Collaboration , *First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole* , ApJ **875**, L1 (2019)
- S. Gillessen et al, ApJ **707**, L114-117 (2009)
- A. Broderick et A. Loeb, Pour la Science, Dossier n°**75** (2012)
- J.P. Luminet, *An Illustrated History of Black Hole Imaging : Personal Recollections (1972-2002)*, arXiv: 1902.11196v1 (2019)
- S. M. Carroll, *Lecture notes on general relativity*, arXiv: gr-qc / 9712019v1 (1997)
- S. Hawking et R. Penrose, La nature de l'espace et du temps, Princeton University Press (1997)
- B. Carter, *Half century of black-hole theory:from physicists' purgatory to mathematicians'paradise*, arXiv: gr-qc / 0604064v1 (2006)
- B. Chauvineau, Notes de cours de Master (2008 à 2019)