

Trous Noirs

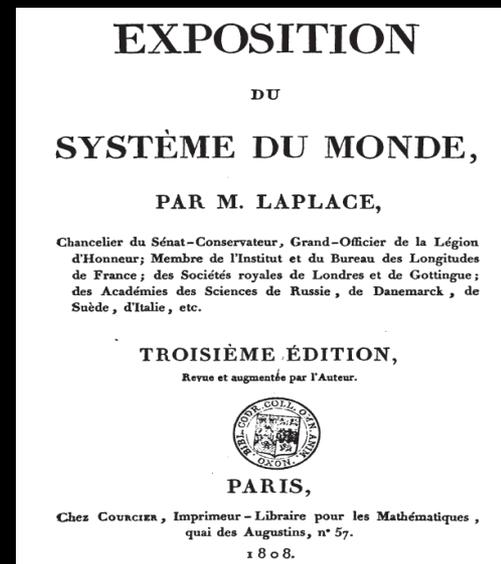
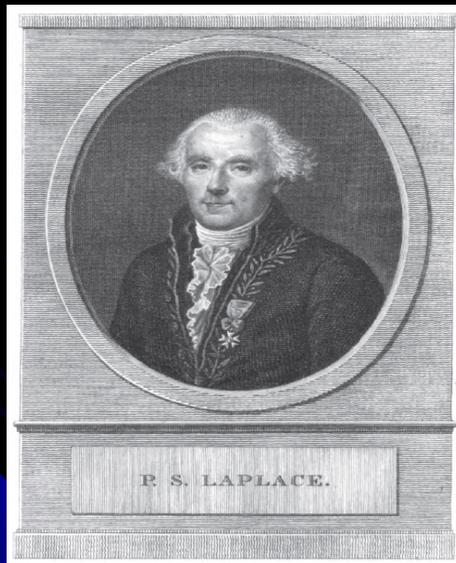
Des enfants non désirés de la Relativité Générale



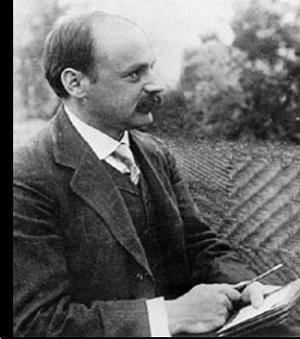
Du trou Noir de Schwarzschild au trou
noir de Kerr Newman

Intermède historique

Ouvrons une parenthèse historique, le révérend John Michell en 1784, puis Pierre Simon de Laplace en 1796, dans l'ouvrage ci dessous, reprenant les travaux de Michell avaient fait remarquer qu'en théorie de Newton, pour des corps très denses, la gravitation pouvait être si intense que la vitesse de libération pouvait être supérieure à la vitesse de la lumière (astres obscurs)!



Résumé des épisodes précédents



Fin 1915: Einstein publie ses équations en deux temps:
Une version préliminaire limitée à $g = -1$, puis 2 semaines après,
une version covariante générale.

Compte tenu de la forme de ses équations, un système de 10 équations aux différentielles partielles du deuxième ordre, couplées, non linéaires, Einstein pense qu'il sera difficile de trouver des solutions analytiques à ses équations!

1916: Pourtant, peu de mois après, Schwarzschild, astronome allemand réputé, partant de la version préliminaire des équations publie une solution (limitée à l'extérieur de l'horizon). Il meurt sur le front russe quelques mois plus tard!

Fin 1916: Son extension que nous appelons la solution de Schwarzschild est en fait due à Droste, un élève de Lorentz!



La métrique de Schwarzschild

On peut se demander, si on applique la RG à notre système solaire, en quoi cela change les lois de la mécanique céleste. Pour trouver une solution en RG on peut s'y prendre comme suit:

Tenir compte des contraintes de **symétrie spatiale sphérique**, qui conduisent à la forme intermédiaire suivante (convention de signe pour $ds^2 = d\tau^2$)

$$ds^2 = A(t,r).dt^2 - B(t,r).dr^2 - r^2.d\Omega^2$$
$$(d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta.d\varphi^2)$$

- Particulariser la solution dans le cadre de la Relativité Générale (vide):

$$ds^2 = (1+\mu/r).dt^2 - (1+\mu/r)^{-1}.dr^2 - r^2.d\Omega^2$$

La métrique de Schwarzschild-2

La limite Newtonienne à l'infini permet de finaliser:

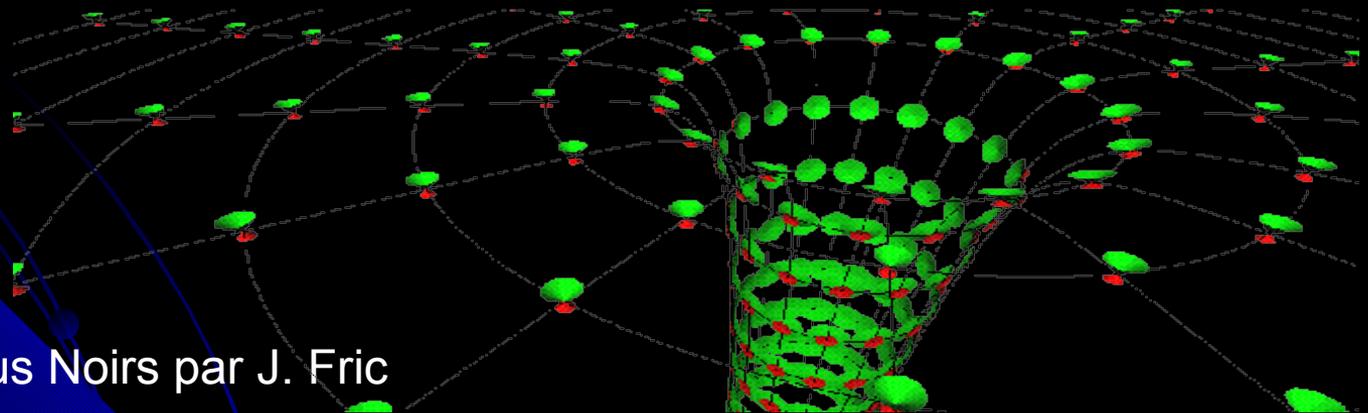
$$ds^2 = (1-2GM/r).dt^2 - (1-2GM/r)^{-1}.dr^2 - r^2.d\Omega^2$$

Où M est la masse de la mécanique Newtonienne.

Métrique statique et un paramètre de longueur associé à une masse apparaît : $r_s = 2GM (/c^2)$, ($c=1$)

- Cette équation «**explose**» pour $r = r_s$ (singularité de coordonnées) et $r = 0$ (si $M \neq 0$): **Signification physique?**

CURVED SPACETIME



La métrique de Schwarzschild -3

Si M est entièrement **contenue** à l'intérieur d'une sphère de **rayon inférieur** à son rayon r_s associé, alors la valeur $r = r_s$ est possible: il y a un **trou noir**.

On voit qu'un TN peut avoir en théorie, **n'importe quelle masse**. La sphère de rayon r_s est appelée l'**horizon** du TN et joue un rôle essentiel.

- **Sous** l'horizon c'est encore du vide sauf au centre: Singularité centrale ponctuelle de paramètre $M > 0$.
- La **gravitation** est si intense qu'elle **recourbe** l'espace sur lui-même et que **rien ne peut s'en échapper**: l'horizon est une membrane spatio-temporelle unidirectionnelle.
- A l'approche du trou noir les effets de marée deviennent gigantesques et déchirent toute matière.

La métrique de Schwarzschild-4

La **gravitation intense** provoque un **ralentissement** spectaculaire du **temps** (par rapport à celui d'un observateur lointain), jusqu'à son gel.

- De l'extérieur du TN, on ne voit **rien sous l'horizon**, dont l'étanchéité nous **protège** de la singularité (**censure cosmique**).
- Dans cette métrique, il y a des orbites **circulaires stables** à partir et au delà de $3 r_s$, des orbites **circulaires instables** de $1,5 r_s$ à $3 r_s$.
- Il existe une orbite hautement instable pour les **photons** à $1,5 r_s$ (appelée sphère de photons).
- Les orbites **non circulaires** ne se referment pas (confirmation de **l'avance inexpliquée de 43''** du périhélie de Mercure).

Trou Noir de Schwarzschild

Le trou noir statique est caractérisé par sa **masse**.

La sphère des photons est hautement **instable**

La surface d'horizon caractérise l'**entropie** du TN.

A l'horizon le rôle du temps et de l'espace **s'inverse**

Sous l'horizon l'espace n'est **plus statique**: Chute **inexorable** vers la singularité. L'horizon nous la cache

(**censure cosmique**) et

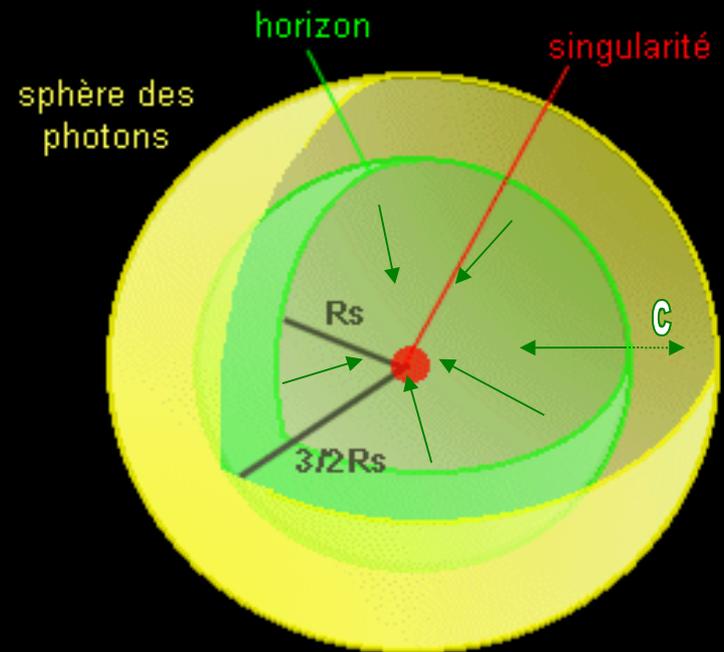
nous en **isole**. Rien de ce qui se passe à l'intérieur

du trou Noir **n'a d'influence**

sur notre Univers. Pourquoi s'y intéresser alors ?

Solution complète: Trou blanc

Trouvée en 1960!



Haro sur les trous noirs !



La singularité sur l'horizon embarrasse bien tenants de cette nouvelle théorie. Le monde scientifique est sceptique!

En 1921, Paul Painlevé au nom de l'Académie des sciences sonne la charge le premier. Il dénonce:

« Les doctrines d'Einstein se réduiront à un corps de formules, qui sans la contredire se fondera dans la science classique. Mais les principes ou conséquences philosophico-scientifiques qui ont été selon les jugements, le miracle ou le scandale de la théorie de la relativité » ne subsisteront pas.

Mais, ironie du sort, sans s'en apercevoir, Painlevé établit la première forme de cette métrique non singulière à l'horizon, ce qui au lieu d'invalider la théorie, au contraire la dédouane de cette horreur! Mais comme ni lui ni personne n'a vraiment compris l'intérêt de sa solution, elle a été ignorée et oubliée!

Et puis Lemaitre est arrivé!



En 1932 dans son article « l'Univers en expansion », Lemaître établit de façon magistrale une solution sans singularité sur l'horizon en considérant le trou noir comme un cas particulier d'univers en expansion!

Il va même plus loin puisque ces équations décrivent en fait la solution complète à 4 régions, ce que malheureusement il ne reconnaît pas!! Il faudra attendre encore 28 ans (Kruskal en 1960) pour cela!

L'héritage de Lemaître

Malgré les travaux de Lemaître (restés méconnus) on se demande si on peut traverser l'horizon.

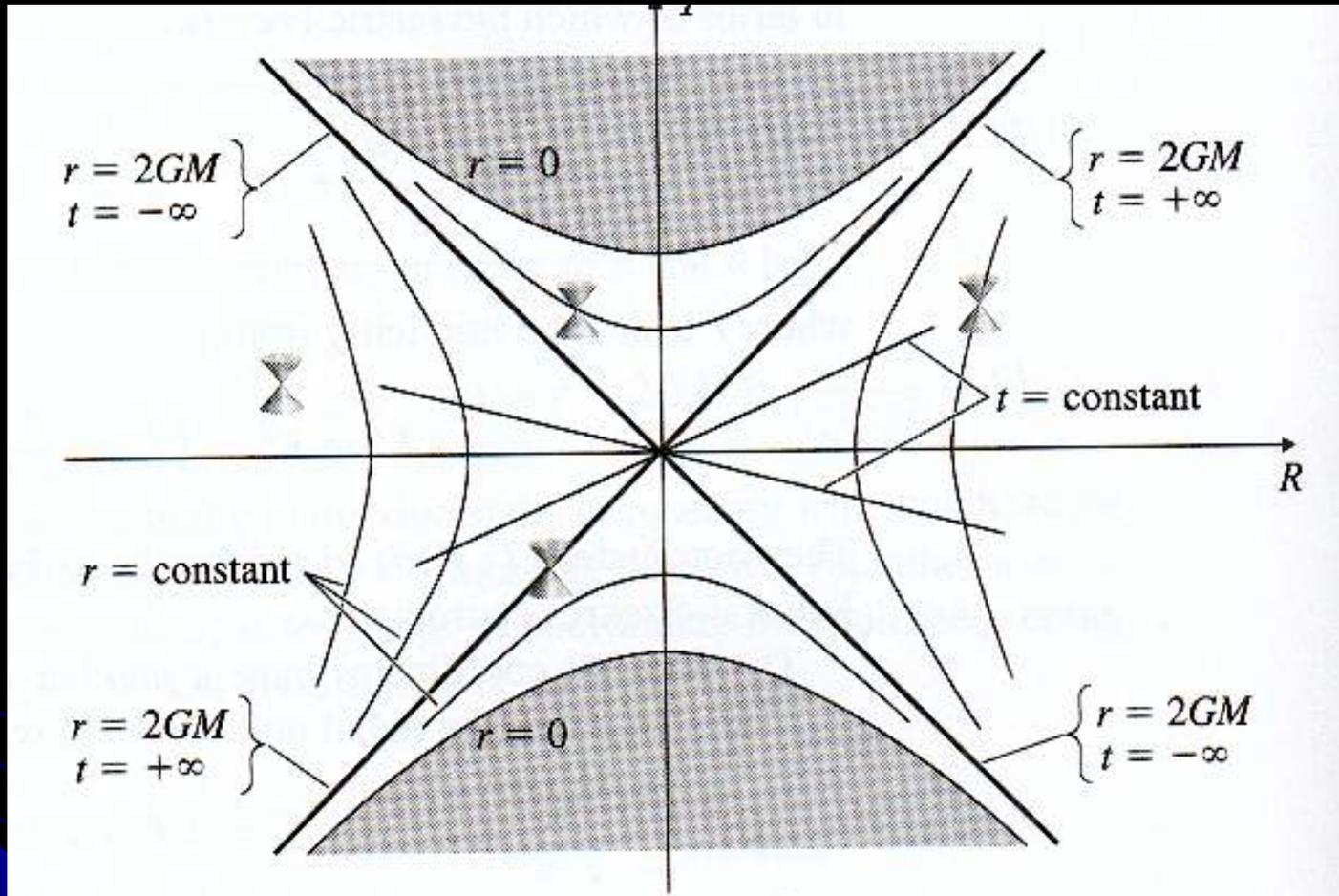
Robertson en 1938 démontre que cela est possible (ce que la forme de Painlevé montrait sans ambiguïté dès 1921)!

Mais vers la fin des années 30, le débat fait toujours rage entre les tenants et les opposants aux trous noirs.

En 1939 Einstein publie un article où il tente de démontrer l'impossibilité d'existence de tels objets alors que Snyder sous la direction d'Oppenheimer démontre qu'au contraire un tel objet peut exister.

Il faudra attendre les années 1960 pour arriver à une meilleure compréhension, bien qu'en 1950 Sygne ait établi une solution complète explicite. Paradoxalement c'est un amateur (Kruskal) qui va proposer la solution la plus explicite qui sera popularisée par Wheeler.

Diagramme de Kruskal



$$u = \frac{1}{2}(u' - v')$$

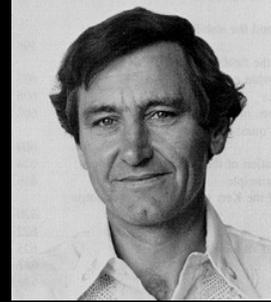
$$= \left(\frac{r}{2GM} - 1\right)^{1/2} e^{r/4GM} \cosh(t/4GM)$$

$$v = \frac{1}{2}(u' + v')$$

$$= \left(\frac{r}{2GM} - 1\right)^{1/2} e^{r/4GM} \sinh(t/4GM),$$

$$ds^2 = \frac{32G^3 M^3}{r} e^{-r/2GM} (-dv^2 + du^2) + r^2 d\Omega^2,$$

1963: Kerr trouve une solution aux trous noirs en « rotation »



De son propre aveu, Kerr n'avait pas réalisé l'importance de ses travaux à ce moment-là, comme en témoigne l'article qu'il publie, très court (une page et demi), et se concentrant uniquement sur des aspects purement mathématiques. On lui avait accordé 10 mn pendant une pause pour présenter sa solution au cours d'un congrès astrophysique, à une assistance passablement clairsemée et assoupie! Par chance qu'il y en avait qui ne dormait pas et qui en a reconnu le caractère génial !

La première solution pour ce type de TN plus « physique » (les corps astrophysiques ont en général un moment cinétique) a été laborieuse car la structure des TN n'a été vraiment comprise que dans les années 60.

Les méthodes utilisées avec succès précédemment ont échoué à décrire un TN «en rotation»

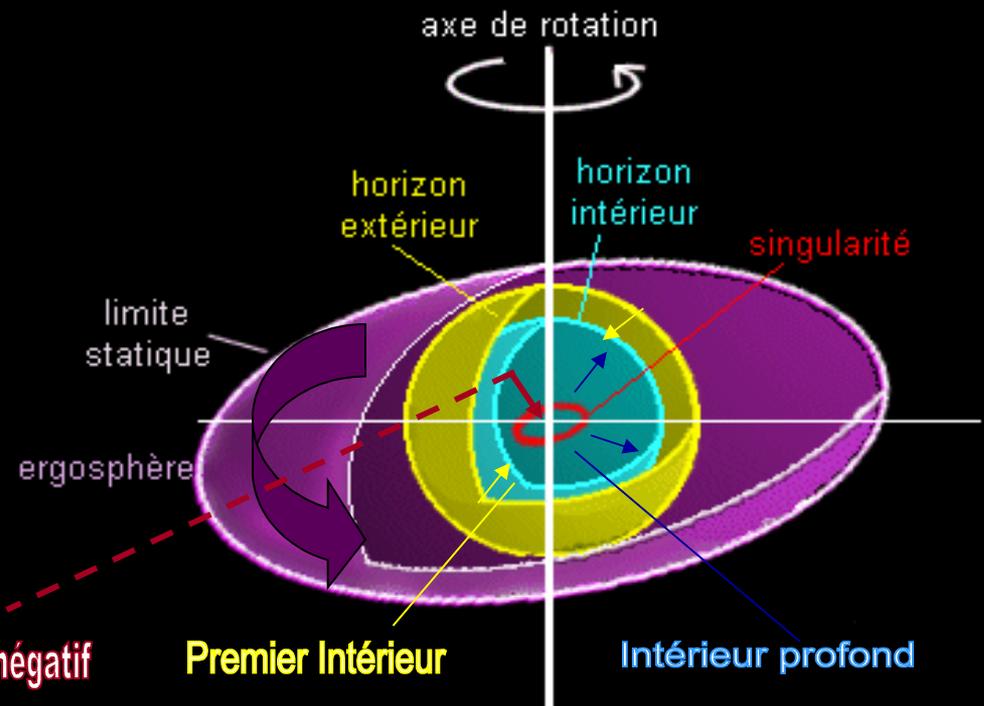
Il a fallu attendre l'apparition de nouvelles méthodes plus formelles (Classification de Petrov, topologie).

Les physiciens ont cédé la place aux mathématiciens en RG.

Les TN de Kerr, Kerr Newman

Le TN de **Kerr** est un TN non chargé en « rotation », celui de **Kerr Newman** est en plus chargé. Considérons le TN de **Kerr**.

- En 1963, Kerr trouva la solution exacte pour une métrique à symétrie axiale. Dans le cas général, il a comme le TN chargé statique (similitudes), **deux horizons** (externe et interne).
- De plus, la singularité centrale est déformée en forme d'**anneau** que l'on peut en théorie traverser et qui en plus débouche sur un **autre univers** (Univers négatif) sans horizon, mais avec **boucles temporelles** près de l'anneau.

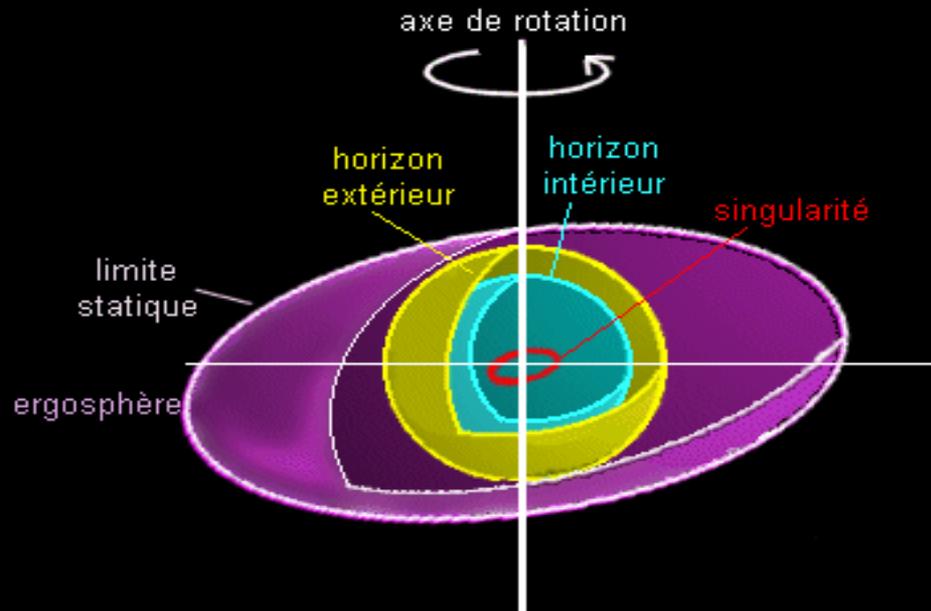


Le trou noir de Kerr

Par ailleurs, du fait de la « rotation » qui produit l'effet Lense Thirring (1918) d'entraînement du référentiel, la limite statique ne coïncide plus avec l'horizon.

Nouvelle zone :Ergosphère à l'extérieur de l'horizon externe où l'espace est entraîné inexorablement par la « rotation », et dont on peut extraire l'énergie de «rotation» du TN,(maximum 29% cas TN extrémal).

La masse du TN se décompose ainsi en une masse irréductible et une masse qui peut être extraite via l'ergosphère.

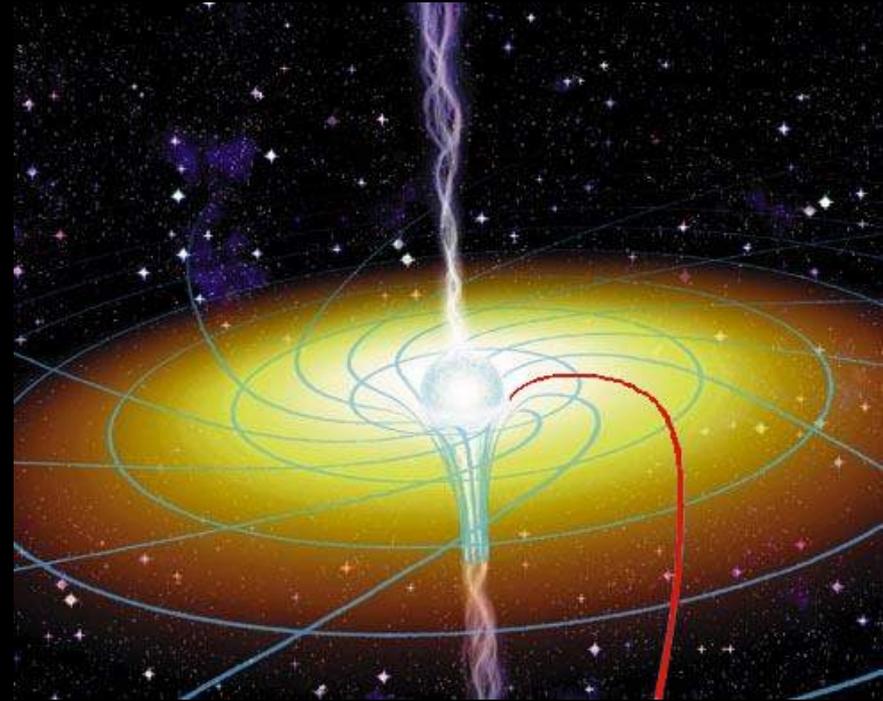


Autour des TN

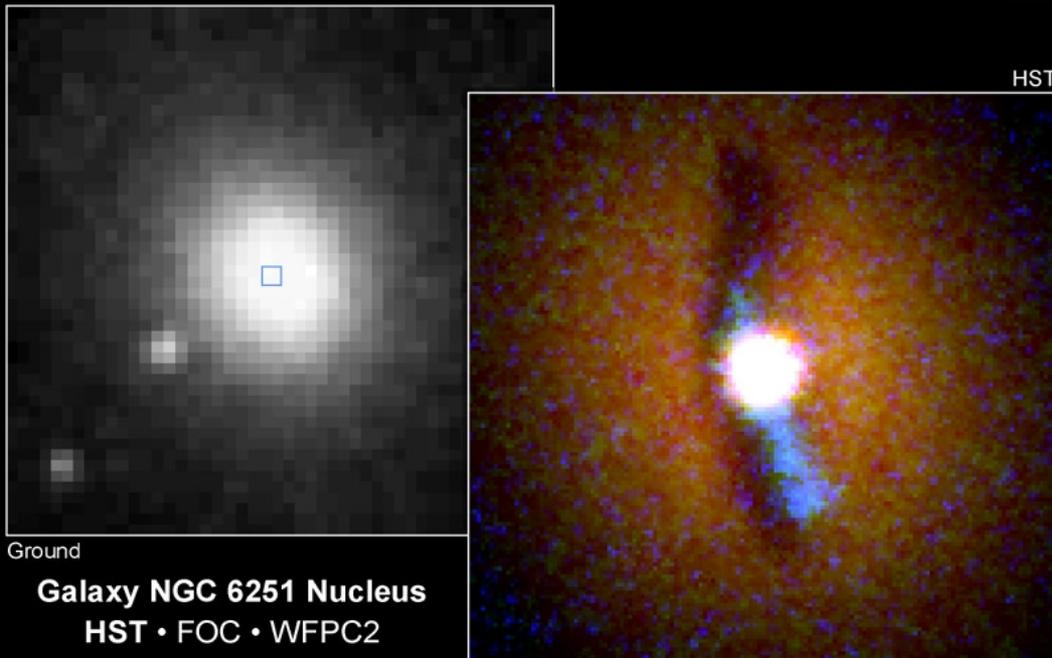
Disques d'**accrétion** : Le TN étant de très petite dimension, la **gravitation est très intense** à proximité immédiate.

Sur les orbites stables les plus proches, la vitesse de la matière peut atteindre **120 000 km/s**.

La matière s'échauffe par collision et donne naissance à des **phénomènes très énergétiques** (qui sont décelables par opposition au TN, qui est invisible)



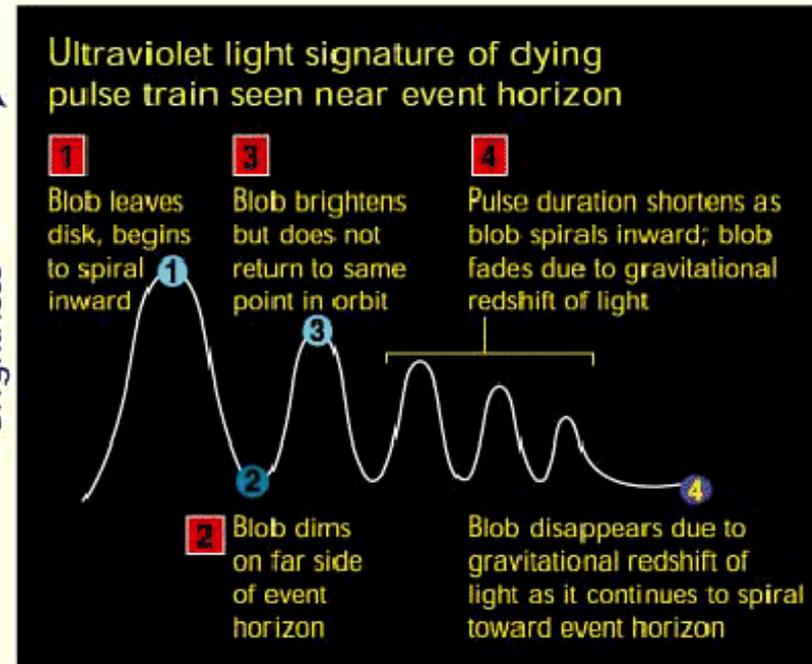
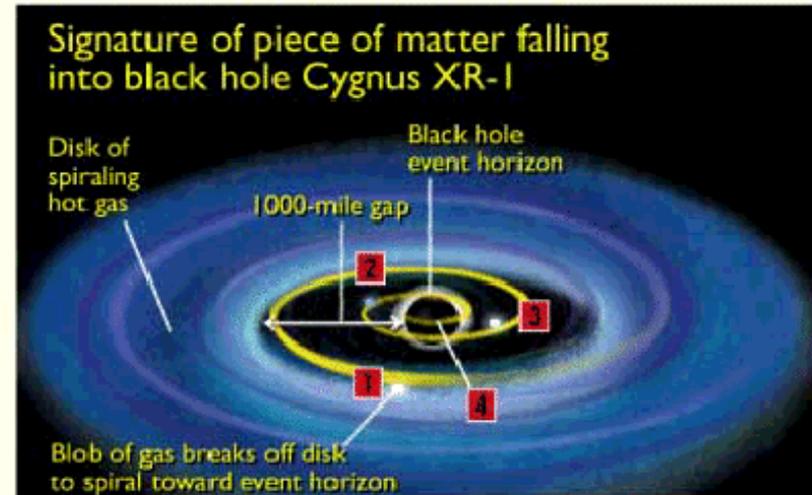
Autour des Trous Noirs



Ground
Galaxy NGC 6251 Nucleus
 HST • FOC • WFPC2

PRC97-28 • ST ScI OPO • September 10, 1997
 P. Crane and J. Vernet (European Southern Observatory) and NASA

Trou noir vu de face



Si le Soleil était un Trou noir *

Avec sa masse ($2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$) et son moment cinétique ($1,63 \cdot 10^{41} \text{ kgM}^2 / \text{s}$), il serait un TN de Kerr dont

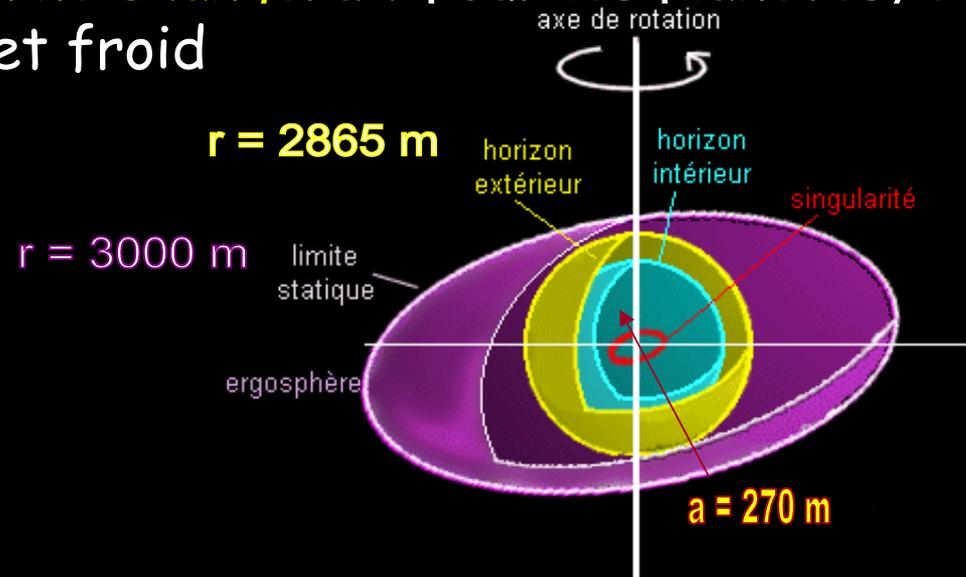


Le rayon r_s serait environ de 3 km.

Le rayon $a = J/Mc$ de la singularité centrale en anneau $\sim 270 \text{ m}$

Un explorateur téméraire franchissant l'horizon, survivrait au maximum une dizaine de **microsecondes**.

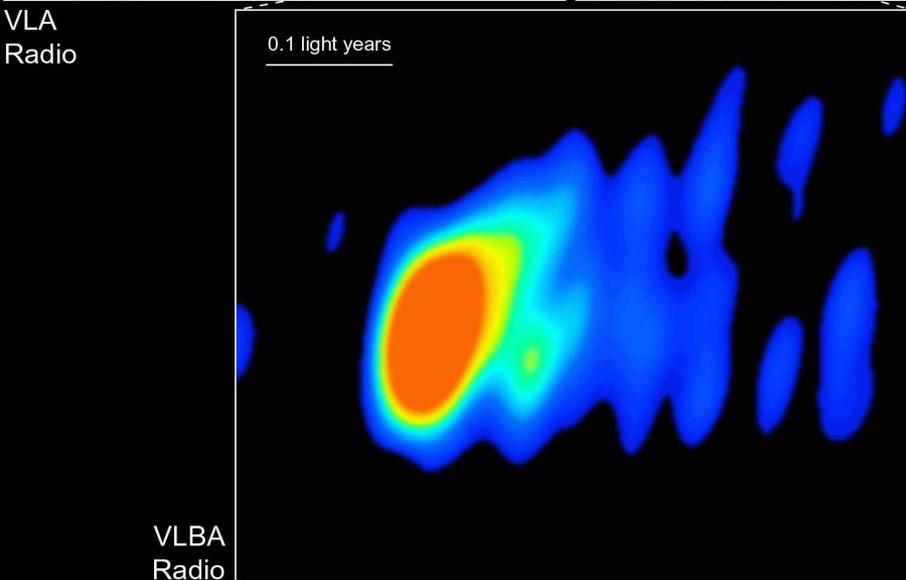
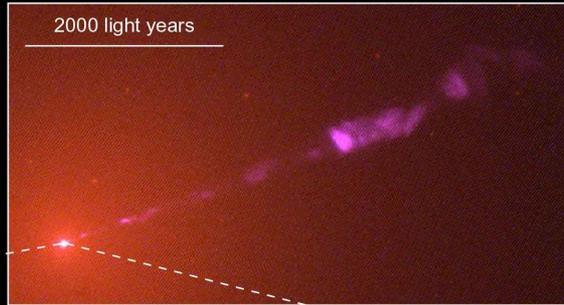
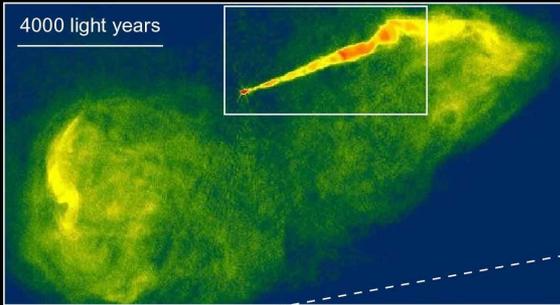
Au niveau **gravitationnel rien ne changerait** pour les planètes, dont la Terre, mais il ferait noir et froid



Coordonnées de Boyer Lindquist

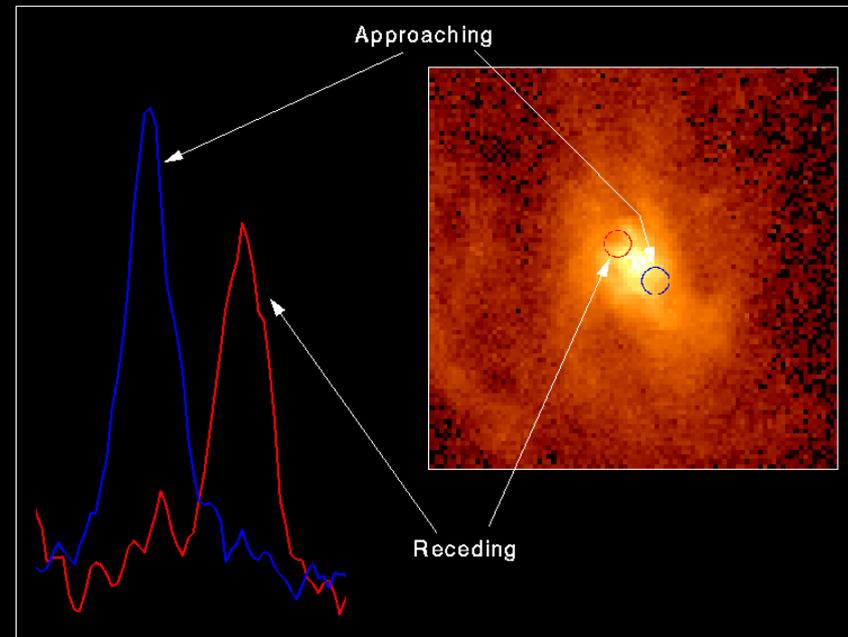
Album trous noirs

Galaxy M87



NASA, NRAO and J. Biretta (STScI) • STScI-PRC99-43

Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87

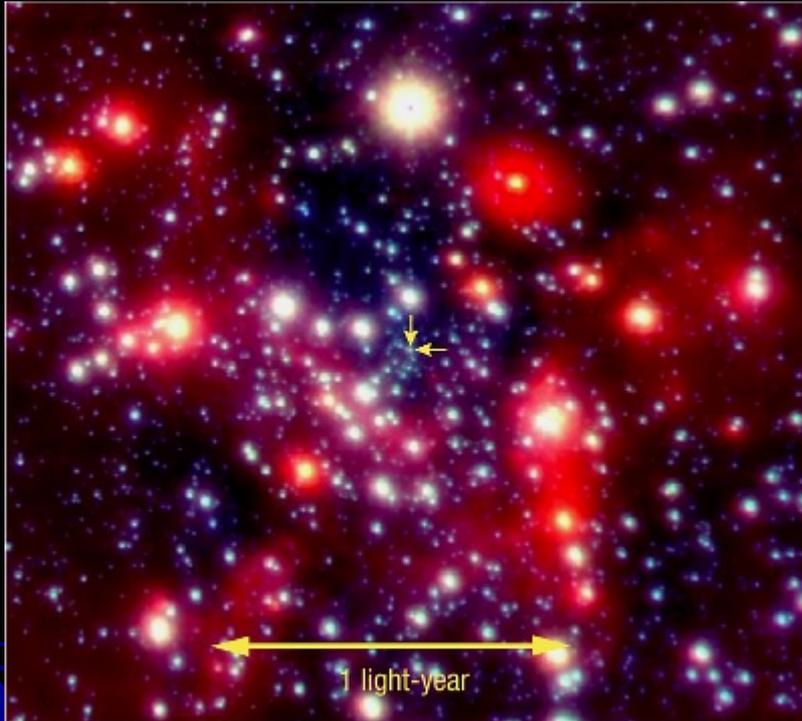


Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph

Détails sur M87
La région d'où part le jet de matière
a été identifiée, et devrait correspondre
à un trou noir de 3 milliards de Masses solaires

03/2003 Les trous Noirs par J. Fric

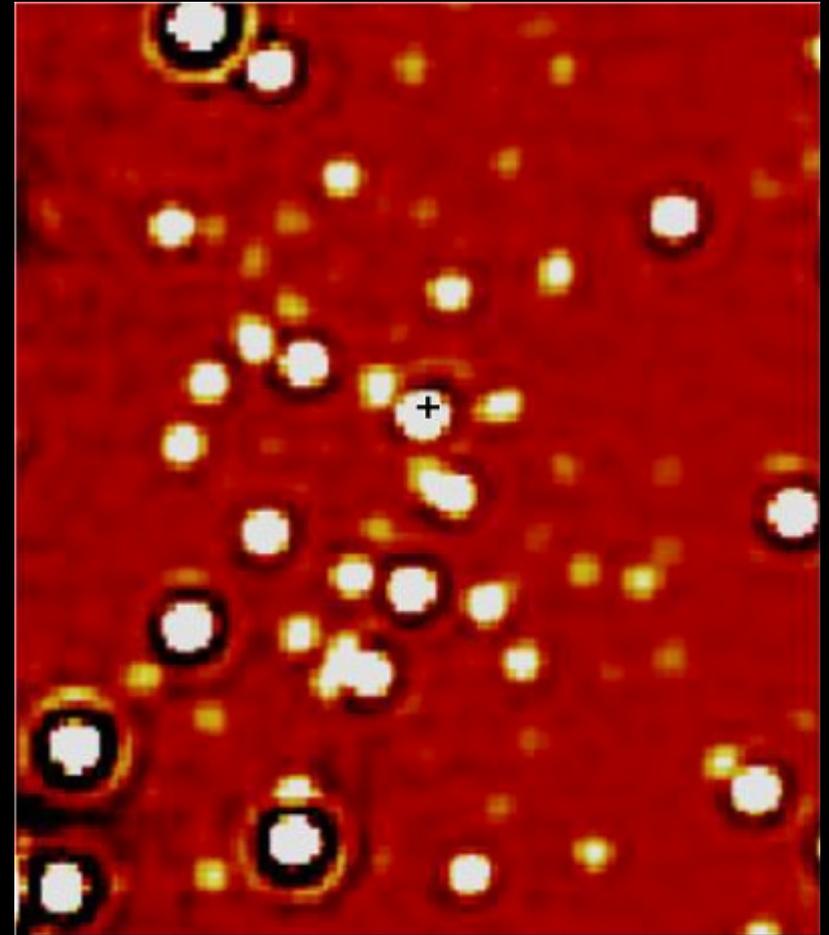
Album Trous Noirs



The Centre of the Milky Way
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23a/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



20 light-days

The Centre of the Milky Way (detail)
(VLT YEPUN + NACO)

ESO PR Photo 23b/02 (9 October 2002)

©European Southern Observatory



Album Trous Noirs

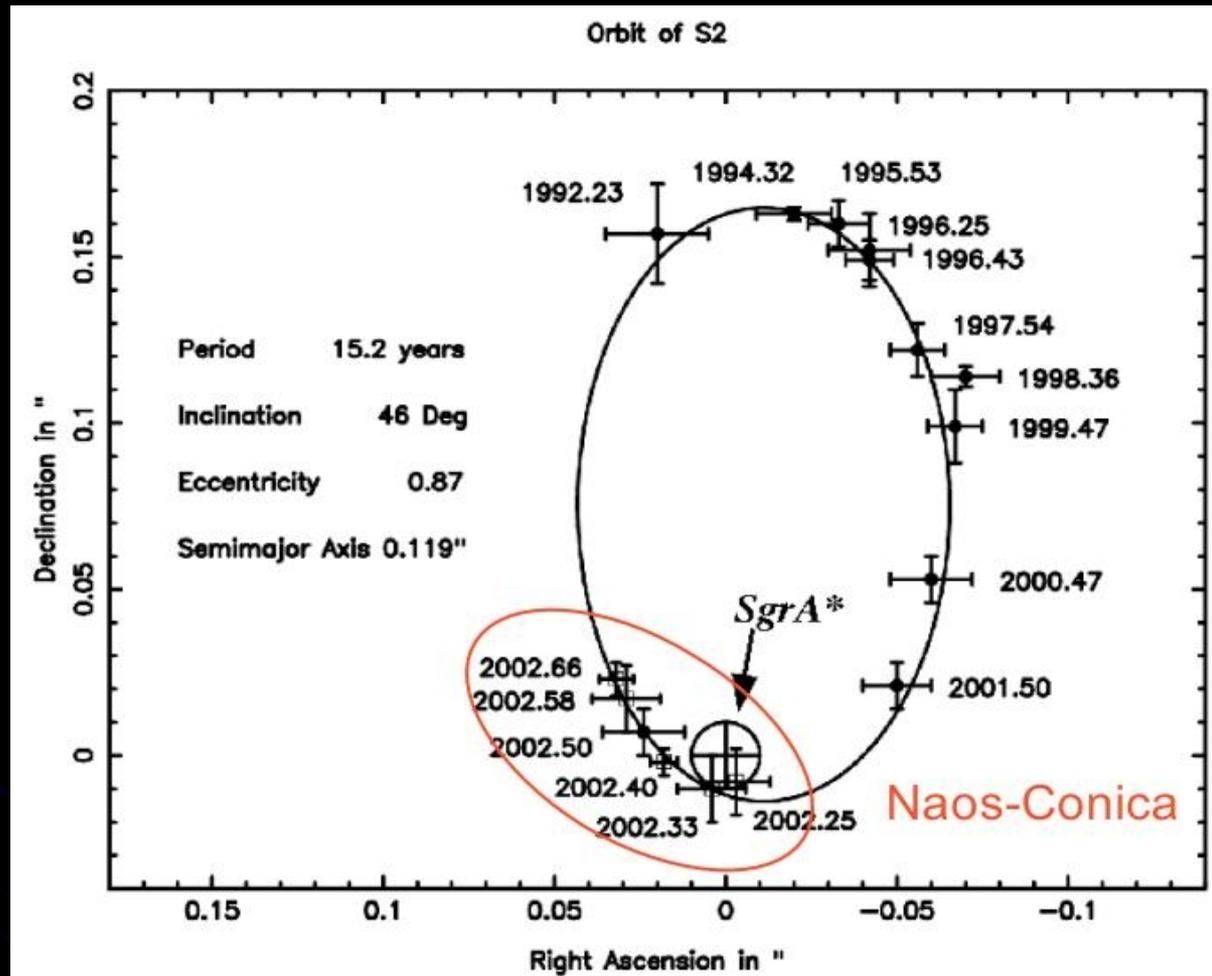


Figure 2. Orbite de l'étoile S2 (ellipse en noir) autour du centre Galactique, c'est-à-dire de Sagittarius A (cercle en noir). La partie entourée de rouge est celle obtenue à partir des observations NAOS/CONICA.*

Trou noir sur fond d'étoiles

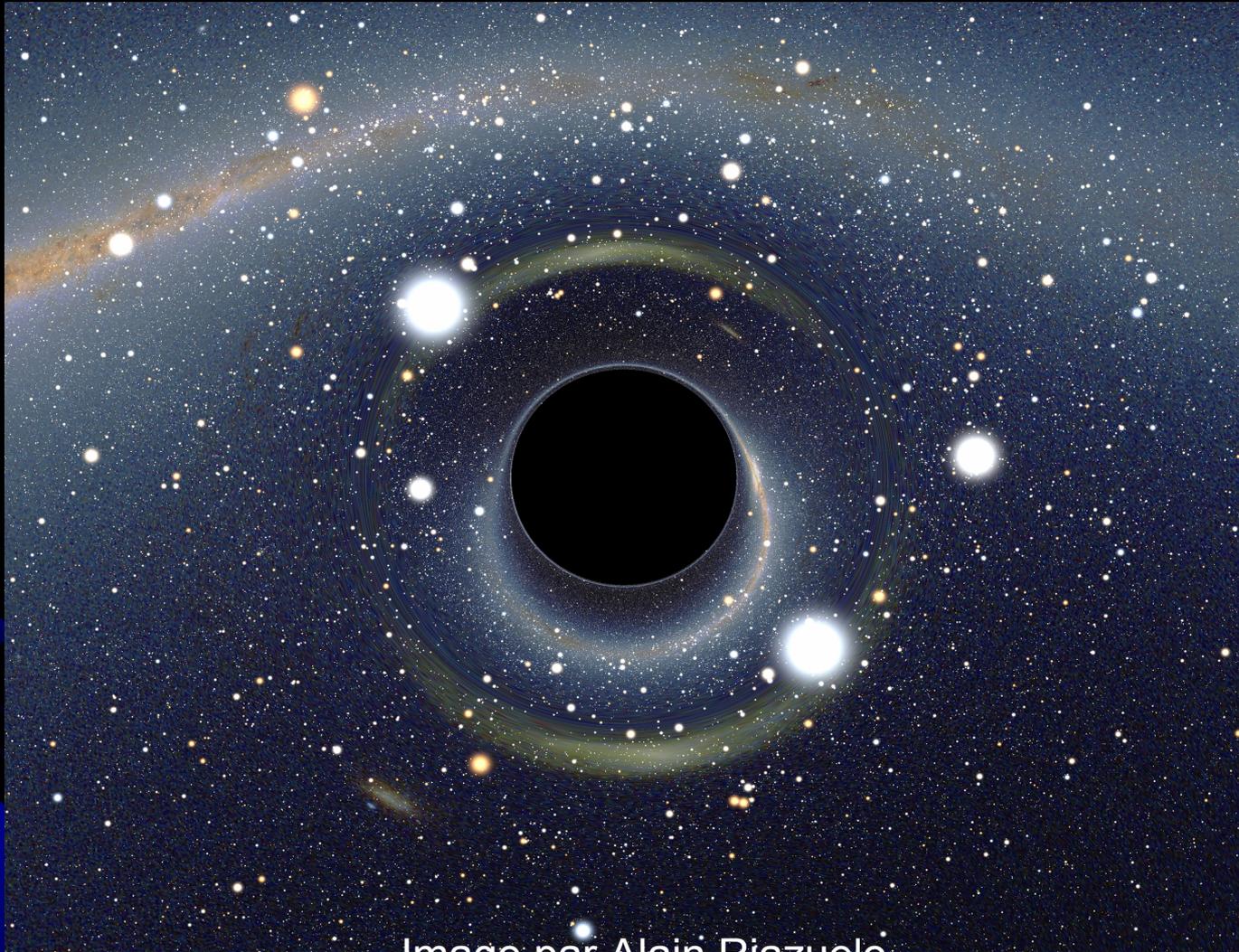


Image par Alain Riazuelo.

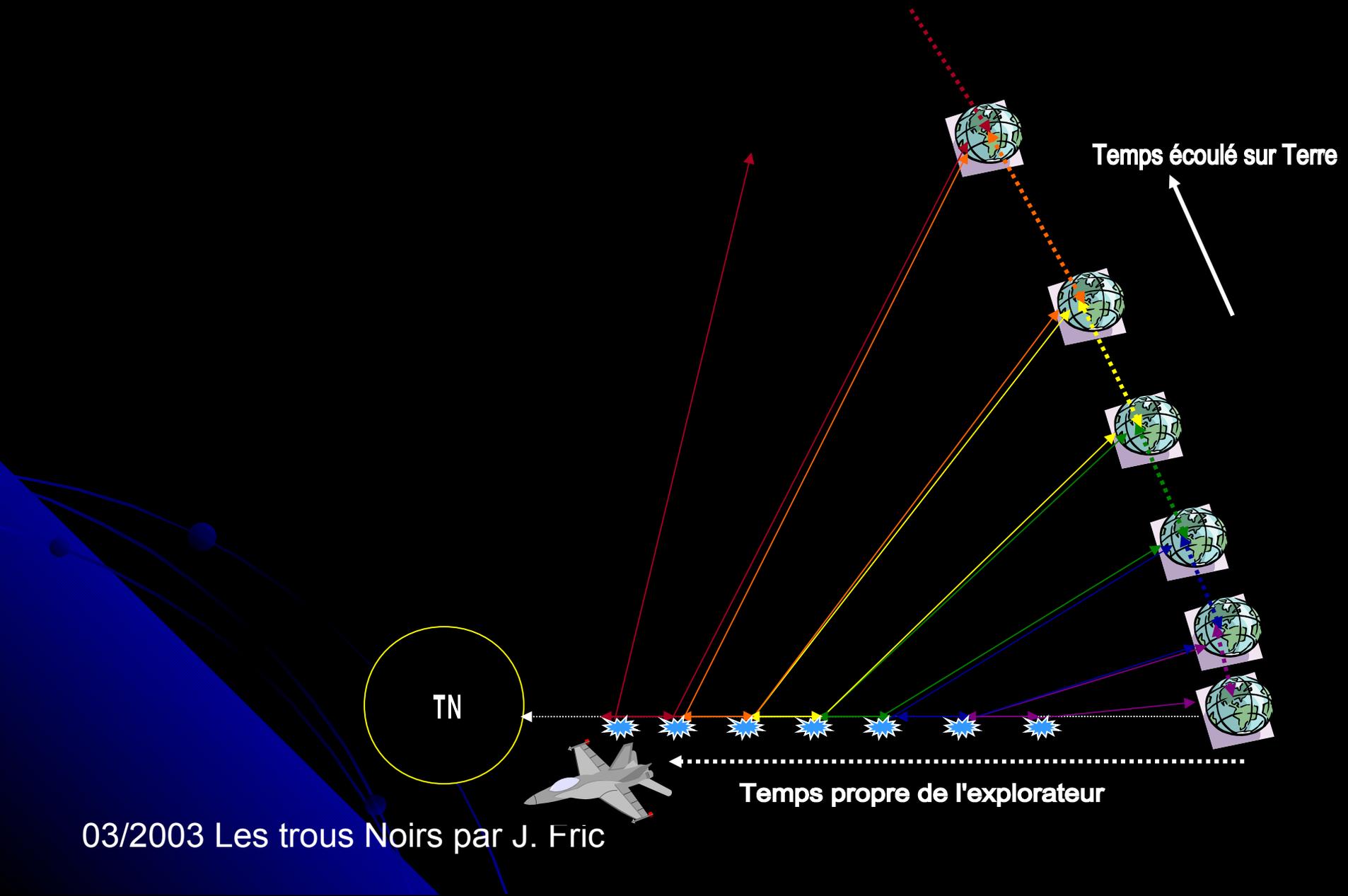
Chute libre vers un TN Statique

Un observateur à **bonne distance** du TN ne verra **jamais** un explorateur qui tombe **en chute libre** radiale vers un TN, franchir l'horizon externe.

Si l'explorateur envoie des **signaux régulièrement** espacés selon son temps propre, l'observateur distant les recevra **de plus en plus espacés** au fur et à mesure que l'explorateur approche du TN.

- Pendant longtemps (la solution n'a été démontrée par Robertson qu'en 1938), on ne savait pas si l'explorateur **franchirait l'horizon**.
- En fait l'explorateur **franchit** l'horizon (**pas de singularité** de métrique), mais des effets de marée: $10^{12}g$ à l'Horizon d'un TN de $r_s = 5\text{km}$, $10^{-7}g$ à l'horizon d'un TN de $5 \cdot 10^9 \text{ km}$).

Chute libre vers un TN Statique



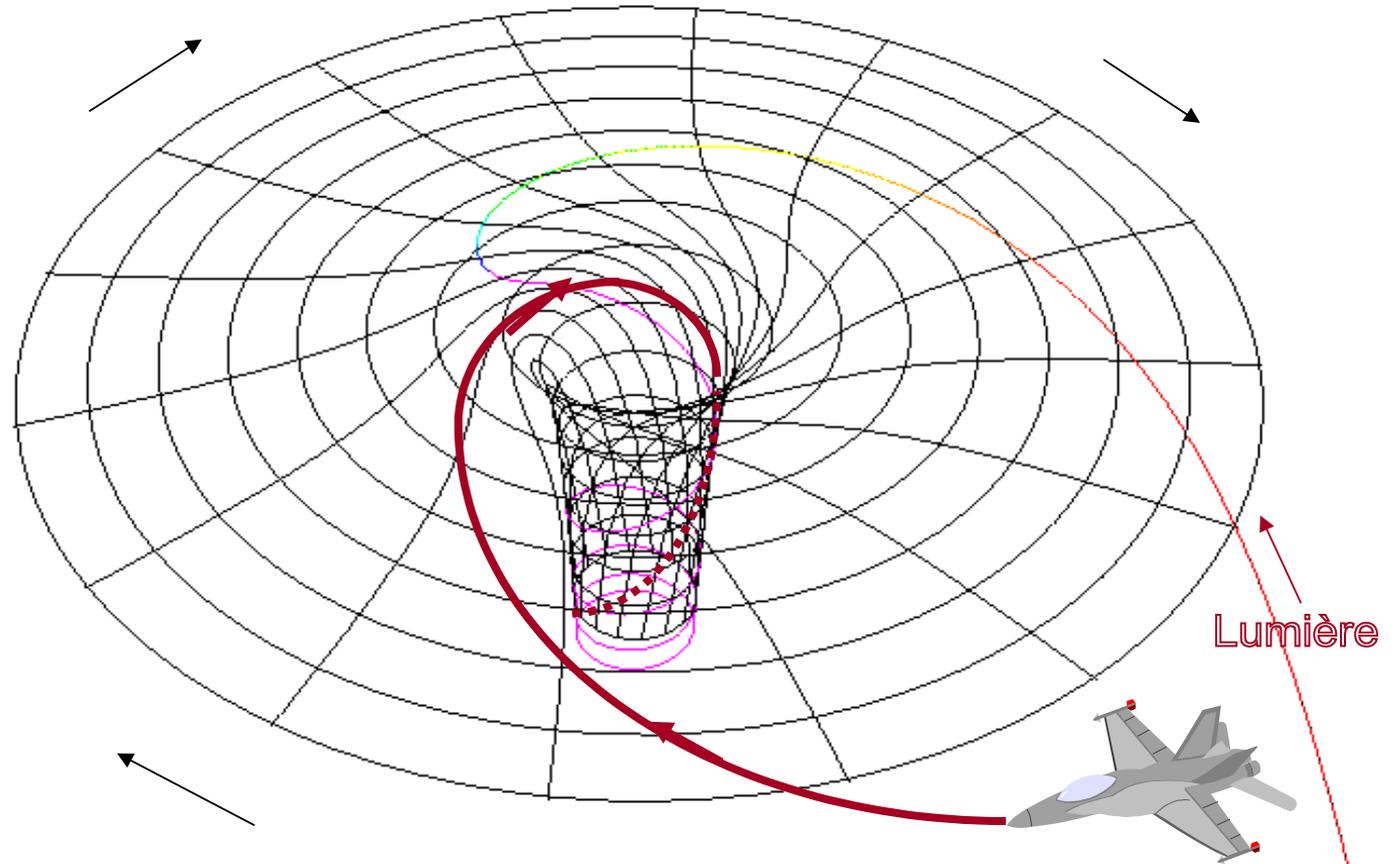
Chute libre TN de Kerr: pôles

On franchit **directement l'horizon** externe.

- On franchit **l'horizon interne** : **blueshift** « infini » de toutes les radiations, en un instant, **toute l'histoire de l'Univers**, telle que vue du TN nous apparaît (film en accéléré), si on survit aux rayonnements très « durs »: Ce qui reste de nous et du vaisseau peut:
 - Soit **re-traverser l'horizon interne**, vers l'horizon externe (le temps est inversé) pour être **expulsé via un « trou blanc » vers un autre Univers**.
 - Soit, si on a pris de l'élan, car la singularité devient répulsive, **passer à travers la singularité**, faire accessoirement l'expérience de boucles temporelles et découvrir un autre univers.

Chute libre vers un TN de Kerr

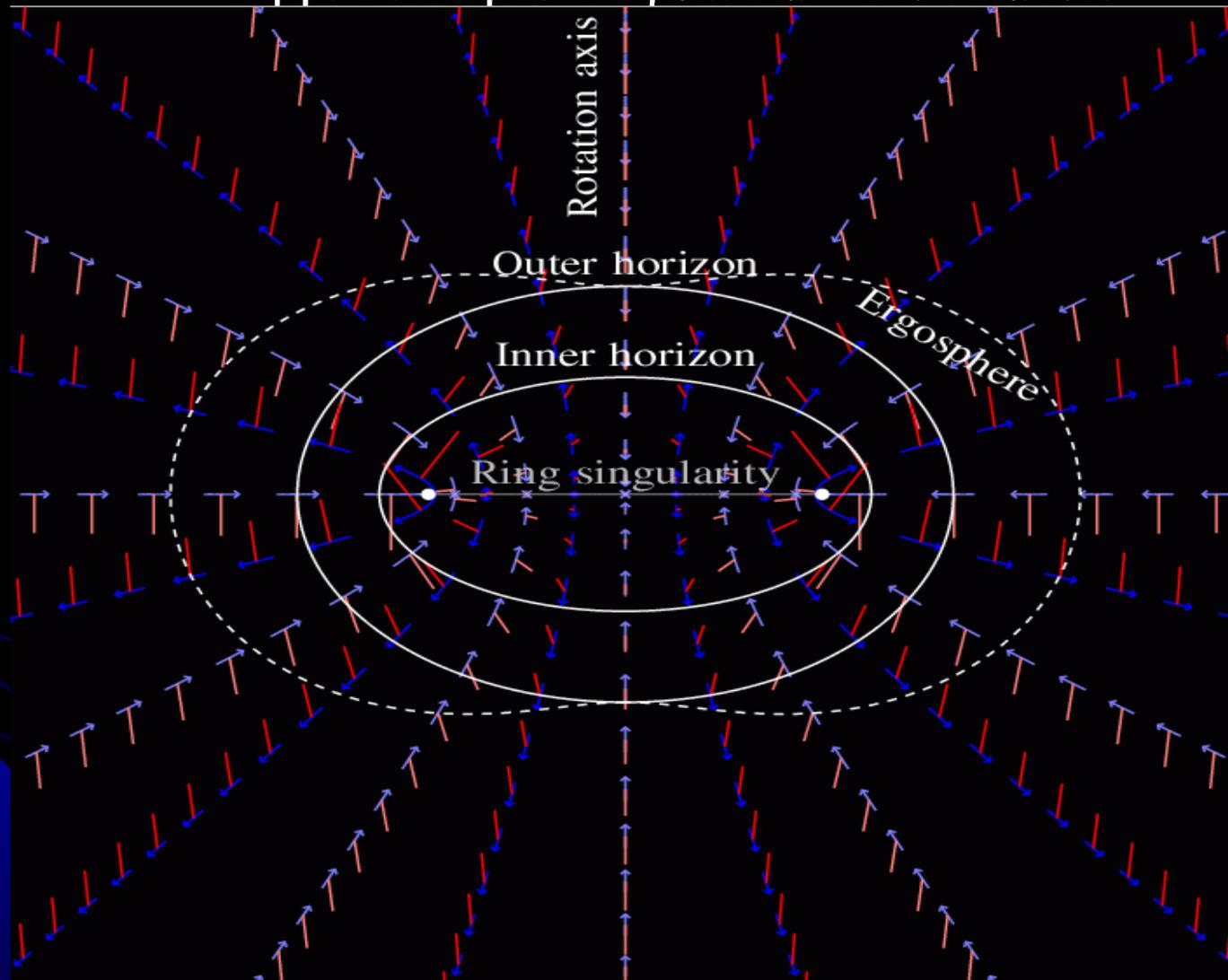
Approche par l'équateur: On tourne!



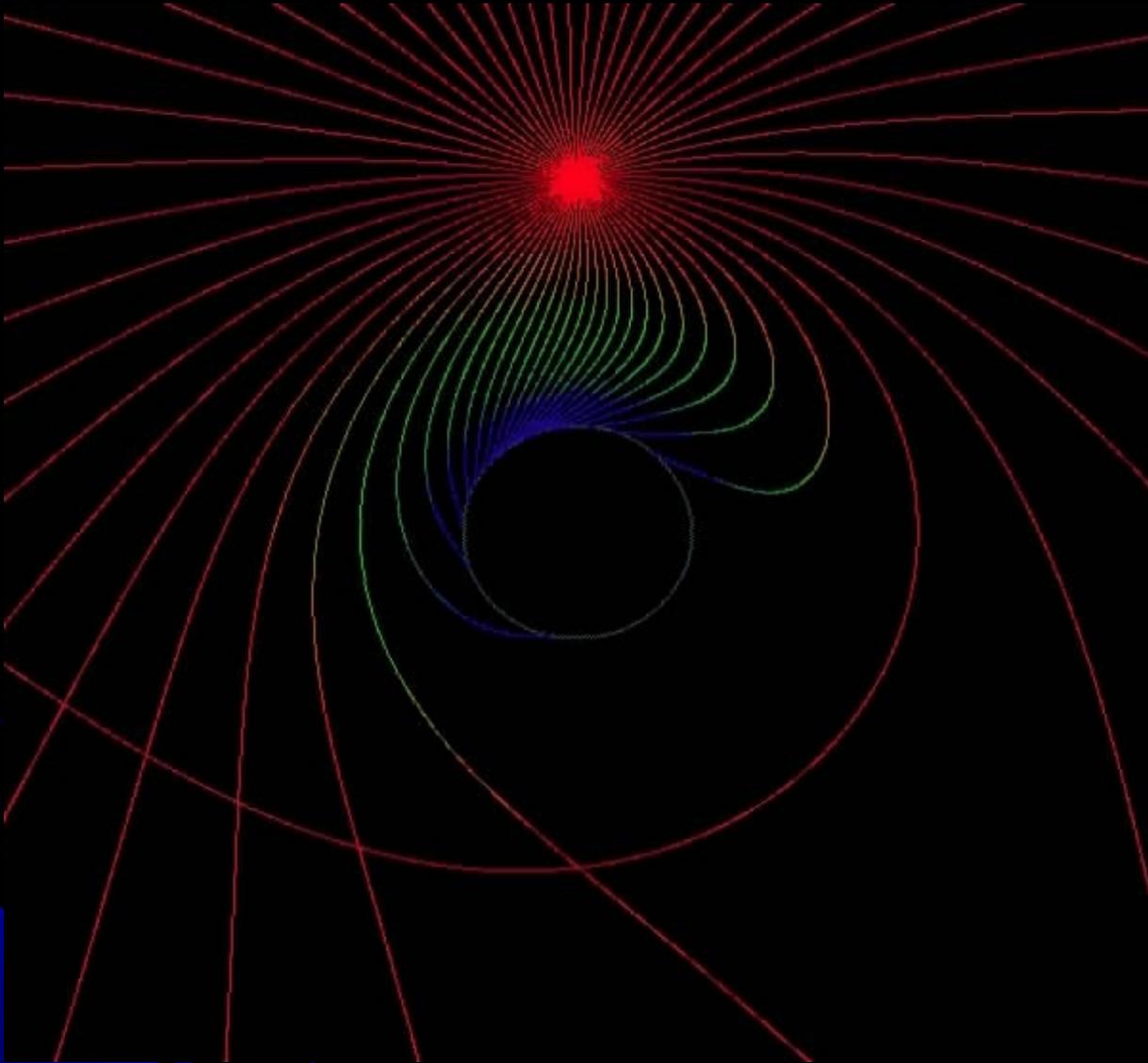
Trou noir de Kerr Extrémal

TN de Kerr

Approche par l'équateur: On tourne!



Déviatation de la lumière (Kerr)



L'évaporation des Trous Noirs-1

Ceci est valable pour **tous les TN**, nous allons traiter le cas des TN de Schwarzschild.

- Historiquement c'est Bekenstein qui a eu le premier l'idée que les TN pouvaient se comporter comme d'honnêtes **Corps Noirs**.

Cela chagrina S. Hawking qui en voulant prouver le contraire confirma l'hypothèse (par un raisonnement de **MQ en espace courbe**)

- Par contre la température « équivalente » est d'autant plus basse que la masse est importante :

$$T = 10^{-7} (M_s/M)^\circ K .$$

Leur durée de vie $D = 10^{10} (M/10^{15}g)^3$, en années

L'évaporation des Trous Noirs-2

Ainsi un mini trou noir de **1 milliard de tonnes** (< taille d'un proton) est à une température de 10^{11} °K et émet en moyenne **10 Gigawatts** (la puissance de quelques centrales nucléaires) pendant **10 milliards d'années!**
Domestiqués, ces TN sont les réservoirs d'énergie libre les plus importants de l'Univers

- Le formidable gradient gravitationnel de ces mini trous noirs « **déchire** » le vide quantique et lui fait **générer** « **ex nihilo** » des particules de plus en plus lourdes au fur et à mesure de son évaporation.

Cela pourrait expliquer comment la gravitation énorme du Big Bang à pu **générer toutes les particules** de l'Univers à partir de « rien » (S. Hawking)

Les trous noirs existent-ils -1 ?

Une théorie est **applicable** en physique si ses **hypothèses** sont à peu près physiquement **satisfaites**.

Il faut connaître la **sensibilité** à l'écart par rapport aux hypothèses. Par exemple, les métriques sont valables dans le vide, quelle influence a la matière? On sent bien que cela va dépendre du rapport des masses entre le TN et cette matière. De plus si la **symétrie** reste respectée, l'effet est quasi insensible. Par contre la métrique est très **sensible à la symétrie** pour la formation de l'horizon intérieur de Cauchy (hautement instable) par exemple.

- Simulations et **calculs numériques** permettent de conforter ces hypothèses. En RG, les lois relèvent d'un **principe extrémal**, garantie de stabilité.

Les trous noirs existent-ils -2 ?

Les Trous noirs étant de plus **non visibles** par principe, et détectables que par leurs effets gravitationnels, directs et induits, cela complique les choses. Aujourd'hui, on a une **quasi certitude** de leur Existence Bon nombre d'objets ont été identifiés à des TN, de toutes masses par ailleurs.

Trous noirs **super-géants** de l'ordre du milliard de masse solaires (M87).

Trous noirs **géants** du million de masses Solaires (centre Voie Lactée)

Moyens, Stellaires, mini- trous Noirs?

Conclusion

L'application de la Relativité Générale fait apparaître ces objets **étranges**, les Trous Noirs, que les dernières observations rendent de plus en plus **plausibles**.

- Résultat d'une action **cataclysmique de la gravitation**, ces objets dont la nature pourra être mieux cernée par une théorie de gravitation quantique, pourraient bien être au cœur, des mystères les plus profonds de l'Univers et de sa genèse (Genèse des particules, Formation des Galaxies, Connexion entre Univers...). Ils sont à ce titre l'objet de recherches intenses.
- En attendant, ils montrent comment nos **concepts de temps, d'espace et de matière peuvent être malmenés dans le contexte de ces conditions extrêmes.**

Références

Images représentant des « écorchés » de TN, statique, statique chargé, de Kerr, les diagrammes relation masse/ taille, autour d'un TN (photo), de Penrose pour TN de Kerr, les schémas et photos « à quoi ressemble un trou noir » sont empruntés à: <http://nrumiano.free.fr> .

Portrait Schwarzschild à <http://cdfinfo.in2p3.fr> .

Malströms. http://www.astro.ku.dk/~cramer/RelViz/text/geom_web/geom_web.html

Les trous noirs (cours 2001). M. Froissart.

<http://cdfinfo.in2p3.fr/~froissart/cours01/cours01.html>

Références mathématiques et autres dessins empruntés à Sean Carroll: Lecture notes on general Relativity:

<http://pancake.uchicago.edu/~carroll/notes/> Traduction du document précédent (J. Fric): Métrique de Schwarzschild et Trous noirs , Rayonnement de Hawking, Comment la gravitation s'échappe des trous noirs.

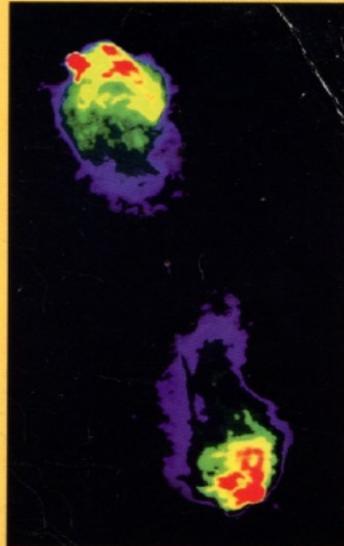
Autres références: Luc Blanchet*: Introduction à la Relativité Générale (chapitres 10 et 11 en particulier), Alain Riazuelo conférence à la SAF.

* références des sites sur notre site

THORNE

TROUS NOIRS ET DISTORSIONS DU TEMPS

Préface de Stephen Hawking



Champs
Flammarion