

Trous Noirs

Les enfants maudits de la Relativité Générale



Ces objets présentés souvent comme des ogres déchirant et engloutissant l'univers n'ont pas bonne réputation ! Reniés par Einstein et longtemps considérés comme hypothétiques, on comprend mieux leur rôle aujourd'hui, pas toujours maléfique !

03/2003 Les trous Noirs par J. Fric

La relativité générale

Après avoir établi la relativité restreinte (1905), Einstein a tenté de l'appliquer à la gravitation. Il y parvient fin 1915.

Dans cette théorie l'espace et le temps ne sont plus des structures fixes indépendantes, cadre immuable des objets et de leur histoire, mais une structure « élastique » entremêlant espace et temps au sein d'une entité composite « l'espace-temps ».

Ainsi formulée la gravitation devient une théorie géométrique de l'espace-temps. Les corps livrés à eux-mêmes suivent les géodésiques de cette géométrie !

Le temps physique cesse d'être universel et devient propre à chacun.

Résumé des épisodes précédents



Fin 1915: Einstein publie ses équations en deux temps:

Une version préliminaire limitée, puis 2 semaines après, sa version générale finale.

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:

- 1- Tenir compte des contraintes de **symétrie spatiale sphérique**.
- 2- Exiger que la solution satisfasse les équations de la **Relativité Générale (vide)**
- 3- La limite Newtonienne à l'infini permet de finaliser:

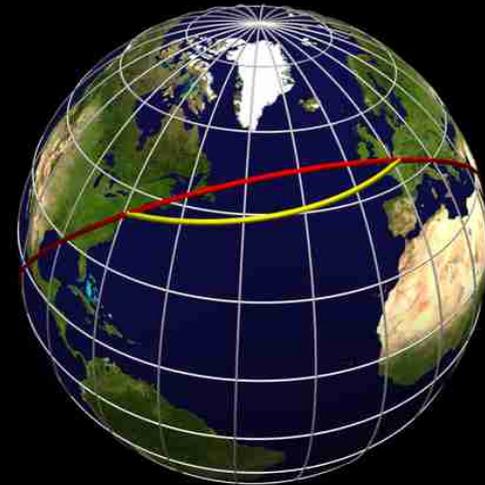
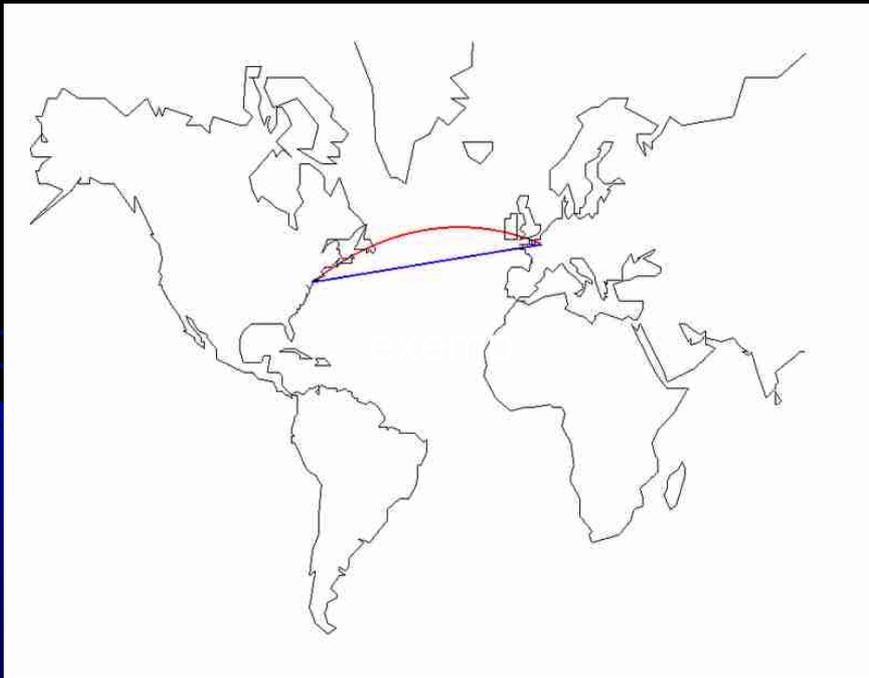
$$ds^2 = (1-2GM/r).dt^2 - (1-2GM/r)^{-1}.dr^2 - r^2. d\Omega^2$$

Où M est la masse de la mécanique Newtonienne.

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

Qu'est ce que le ds^2

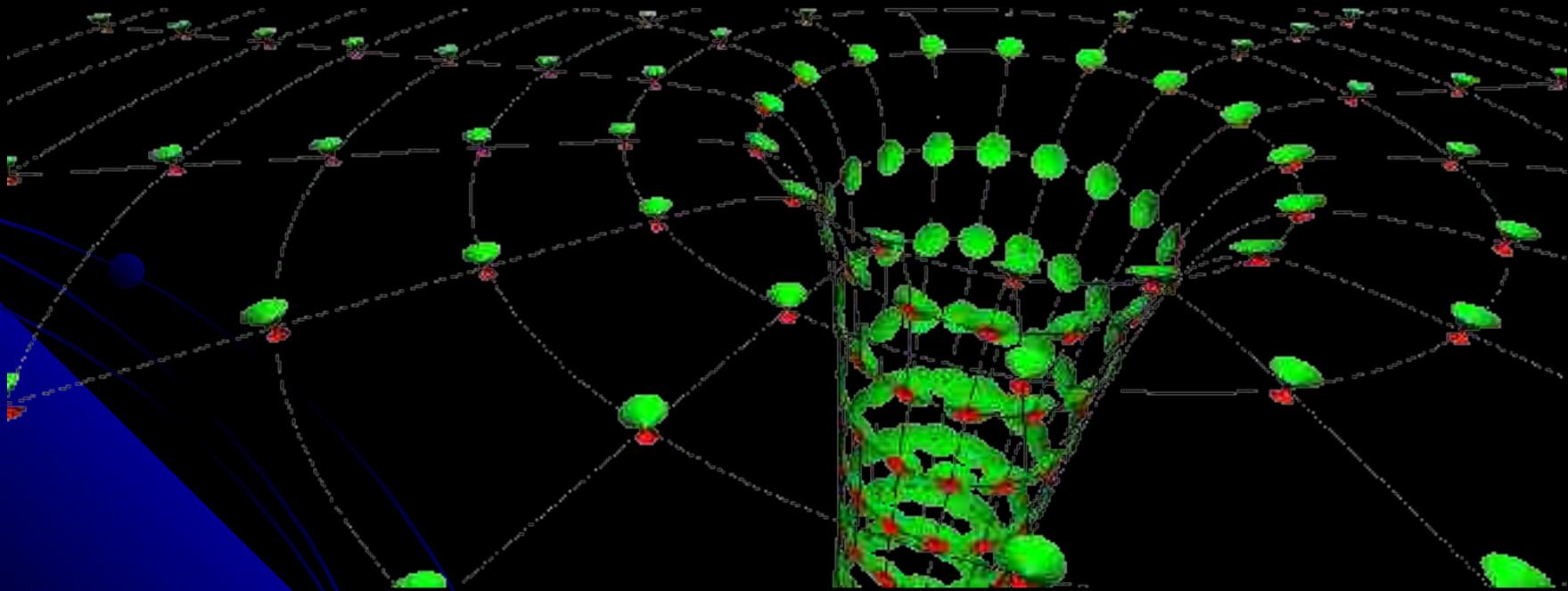
C'est l'élément de longueur dans un espace qui permet de calculer la longueur d'un trajet (courbe dans notre cas)



La métrique de Schwarzschild-2

- 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 peuvent devenir gigantesques et déchirer toute matière. Cet effet dépend de la masse du Trou noir. En chute libre, pied en avant, sur l'horizon, la traction sur un homme de 1,8m vaut $\approx 10^8$ kg/dm² pour un TN de $1 M_s$, 10^6 fois notre poids, mais 10^{-10} pour un TN de $10^9 M_s$.

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.

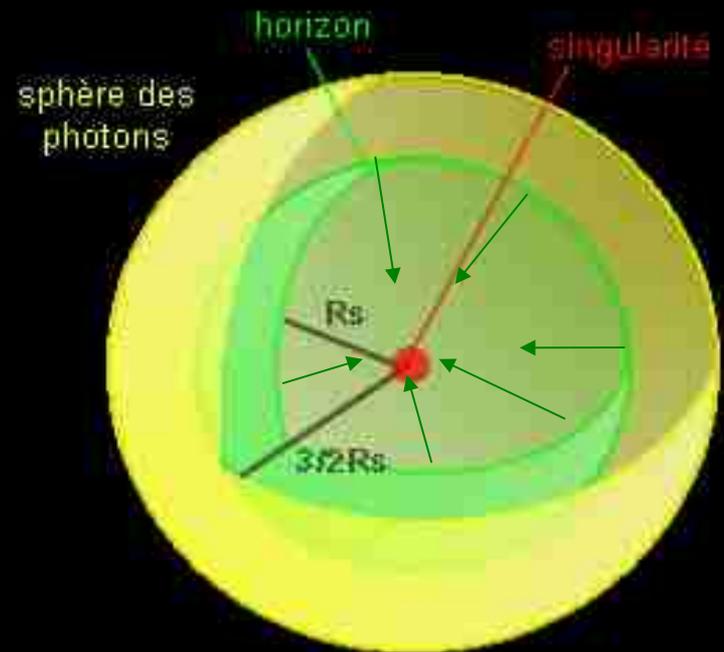
- De l'extérieur du TN, on ne voit **rien sous l'horizon**, dont l'étanchéité nous **protège** de la singularité (**censure cosmique**).
- Dans cette métrique, il y a des orbites **circulaires stables** à partir et au delà de **$3 r_s$** , des orbites circulaires **instables** de **$1,5 r_s$ à $3 r_s$** .
- 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 inexplicquée de $43''$** du périhélie de Mercure).

Trou Noir de Schwarzschild

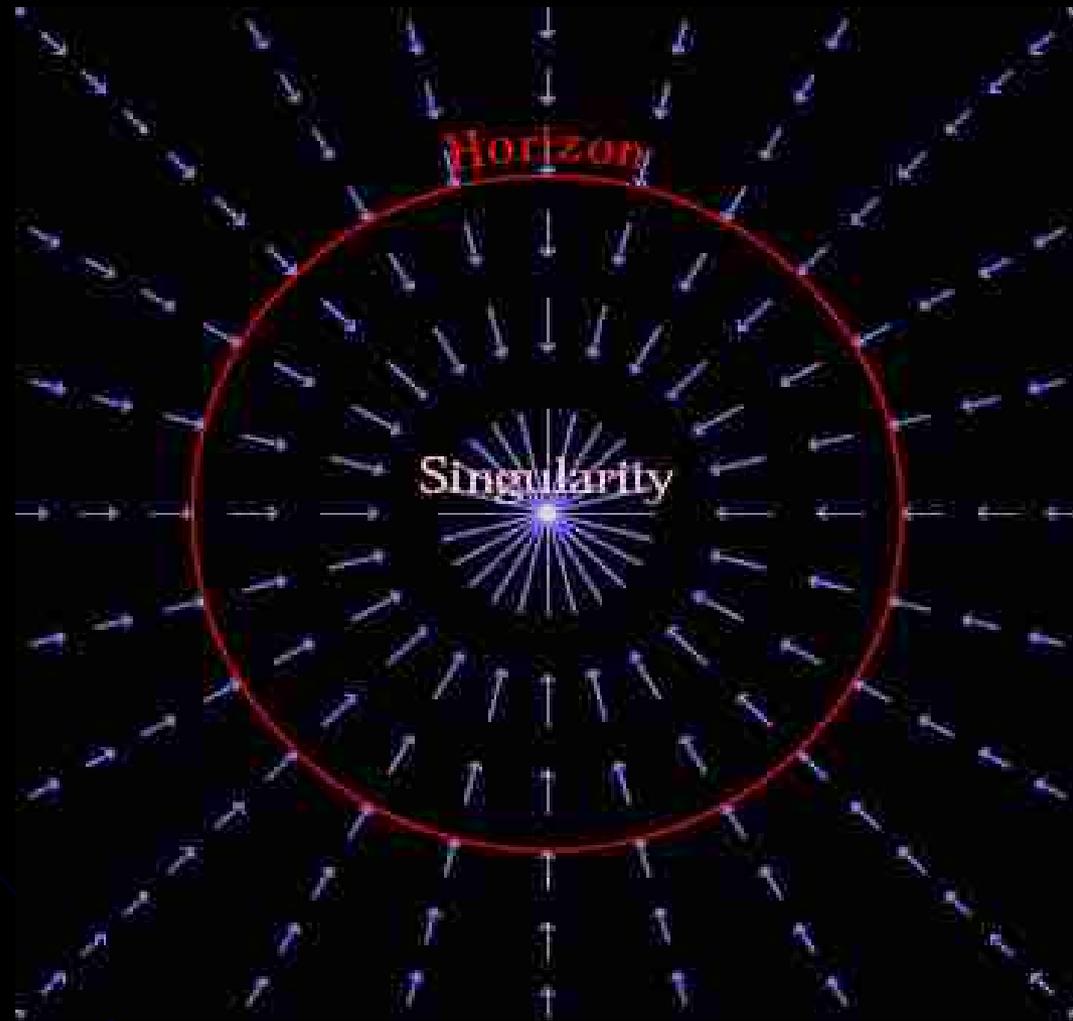
Le trou noir statique est caractérisé par sa **masse**. La sphère des photons est hautement **instable**. La surface d'horizon caractérise l'**entropie** du TN. A l'horizon le rôle du temps et de l'espace **s'inverse**. Sous l'horizon l'espace n'est **plus statique**: Chute **inexorable** vers la singularité. 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!



L'espace en effondrement



Haro sur les trous noirs !



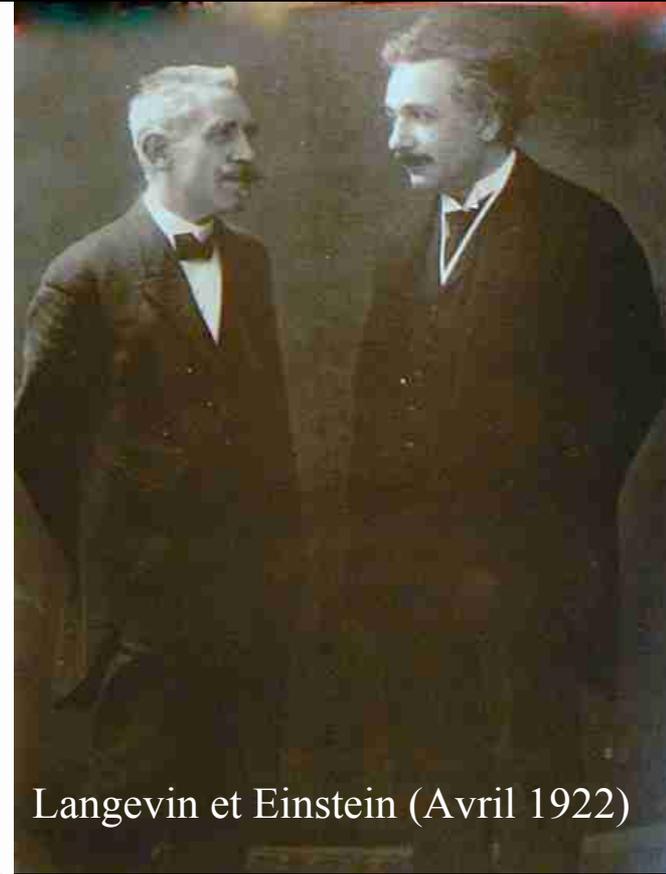
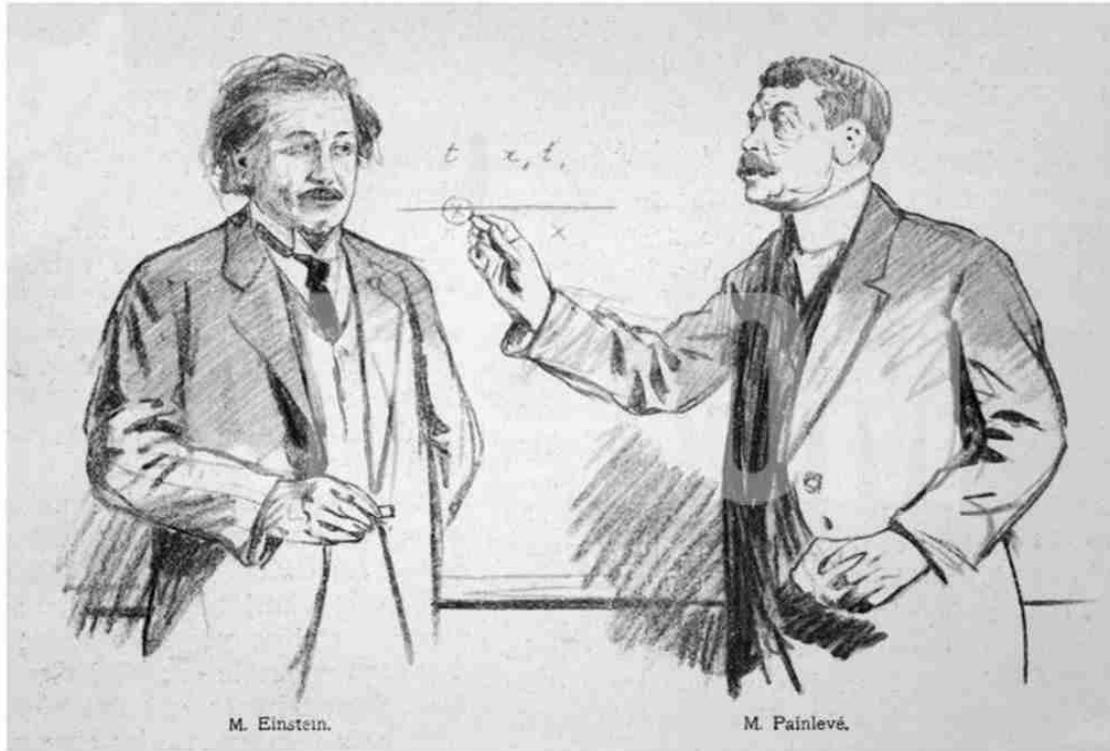
La singularité sur l'horizon embarrasse bien tenants de cette nouvelle théorie. Le monde scientifique est sceptique!

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!

La rencontre du 5 avril 1922 à Paris



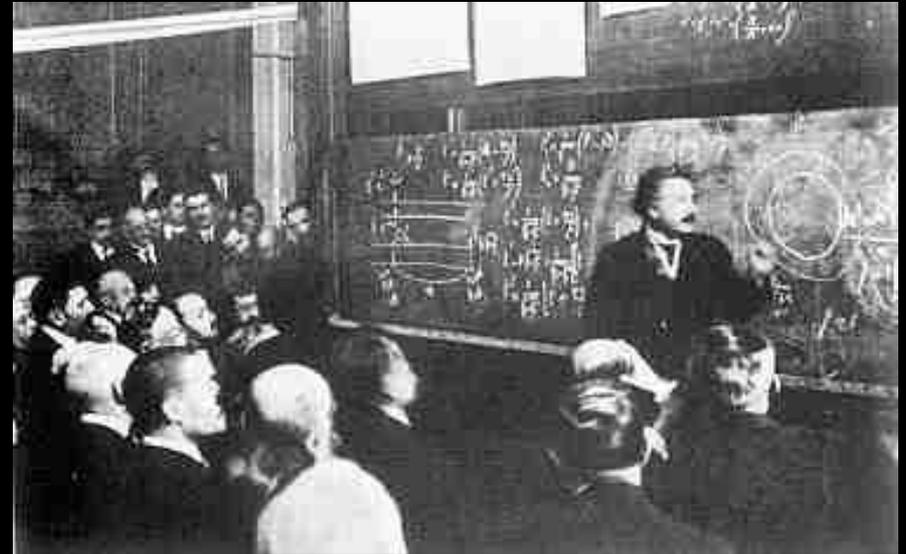
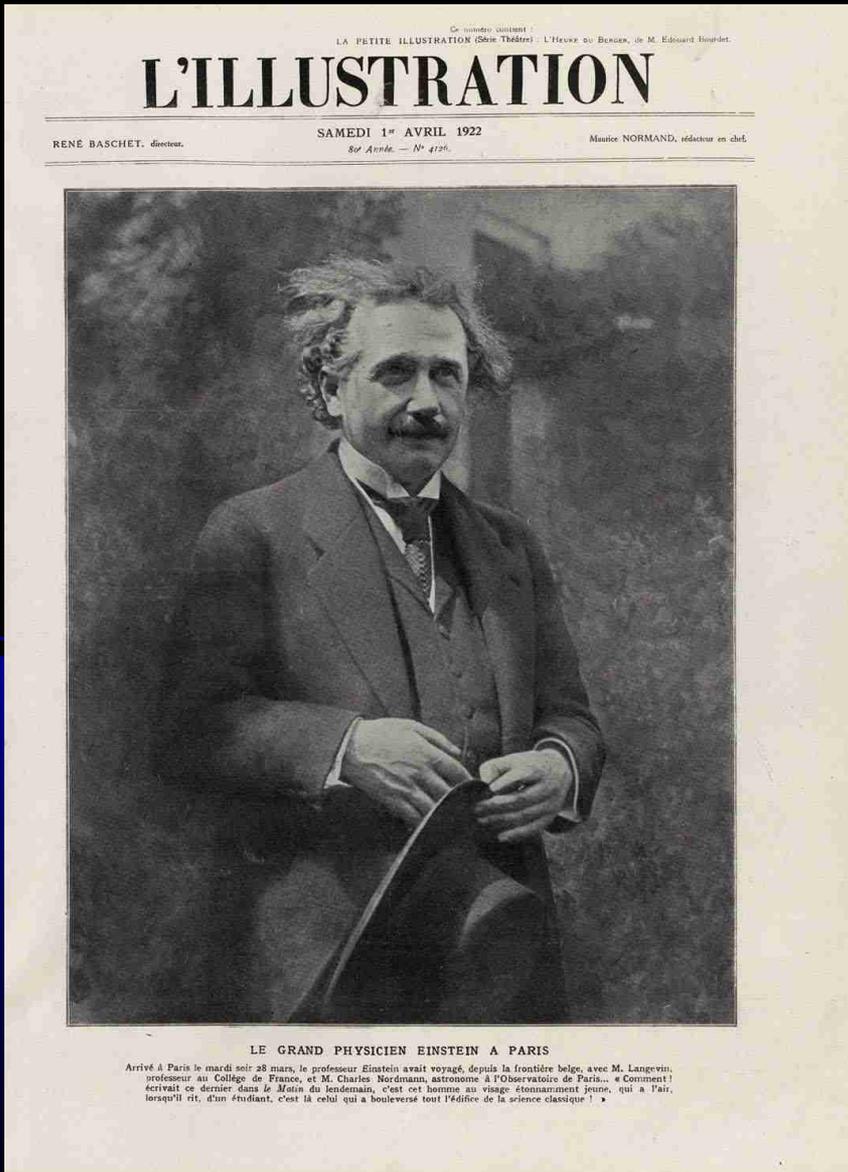
Langevin et Einstein (Avril 1922)

Le point culminant de ce différend sur la meilleure solution possible des équations d'Einstein a lieu pendant le voyage d'Einstein à Paris le 5 avril 1922. Painlevé aidé de son collègue mathématicien J. Hadamard ouvre le débat sur la singularité de Schwarzschild, que les participants français à ce débat appelaient « la catastrophe d'Hadamard ». Au cours du débat, Einstein, rejetant la solution de Painlevé, prend le dessus, et celui-ci se rallie à la relativité. Cela sonne le glas de sa proposition ! D'après : « Einstein un siècle contre lui » p. 101 de A. Moatti.



Painlevé
en 1923

1922 Einstein au Collège de France invité par Langevin



à la Maison des polytechniciens

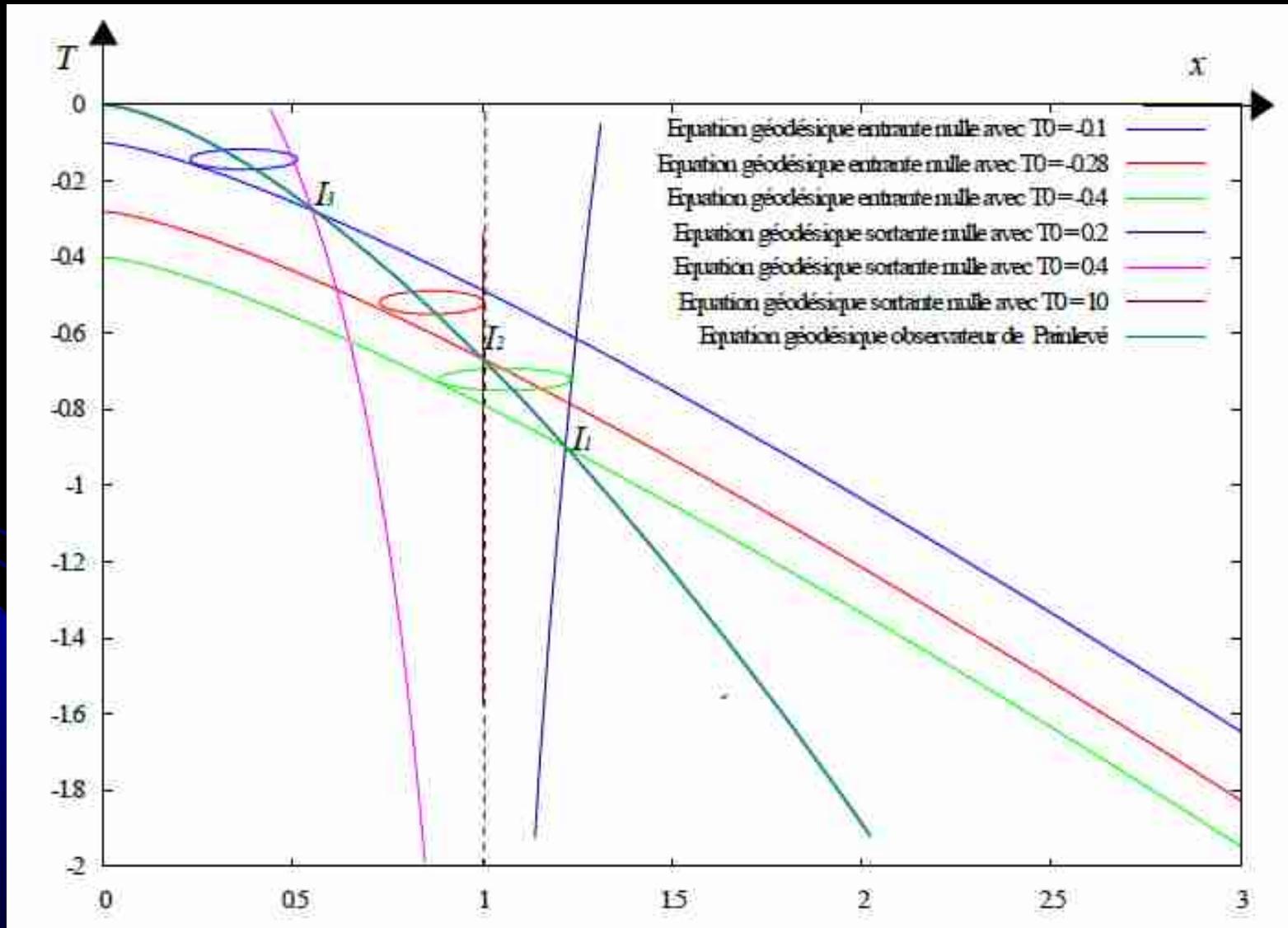


Einstein a rejeté à tort la forme de Painlevé qui montre que le paradoxe de l'horizon dans la forme de Schwarzschild est fictif !

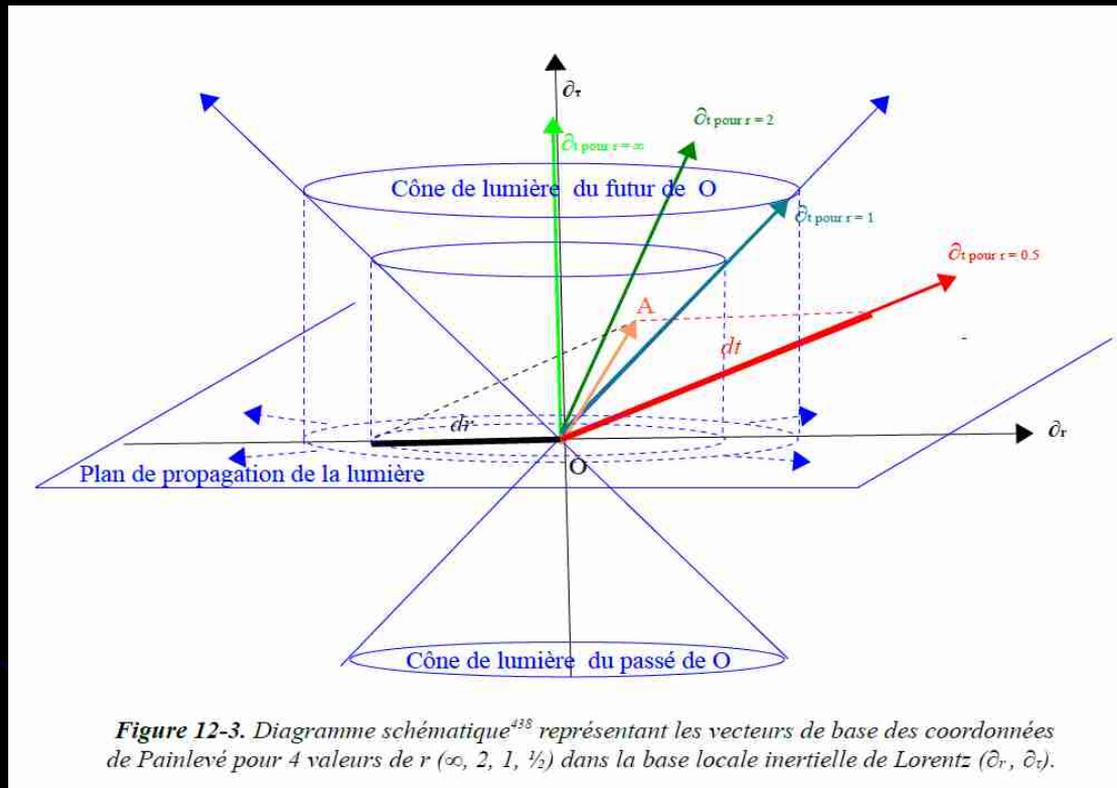
Et qui montre que c'est l'orientation de l'espace-temps qui permet de franchir cet horizon dans un sens mais pas dans l'autre: Ceci se manifeste par le basculement des cônes de lumière régissant la causalité

• Ceci sonnera le glas de la solution de Painlevé qui ne resurgira que que dans les années 2000.

Un effet de l'orientation : Le basculement des cônes de lumière de l'observateur local dans la forme de Painlevé.



Représentation duale de la précédente : L'observateur local voit un espace-temps symétrique.



Ceci illustre la défiance des scientifiques vis à vis d'un espace-temps orienté. D'où le « principe de réversibilité » de Painlevé ! L'apparente contradiction entre les deux représentations est la manifestation de la courbure de l'espace temps !

Comment la forme de Painlevé montre que le paradoxe de l'horizon dans la forme de Schwarzschild est fictif !

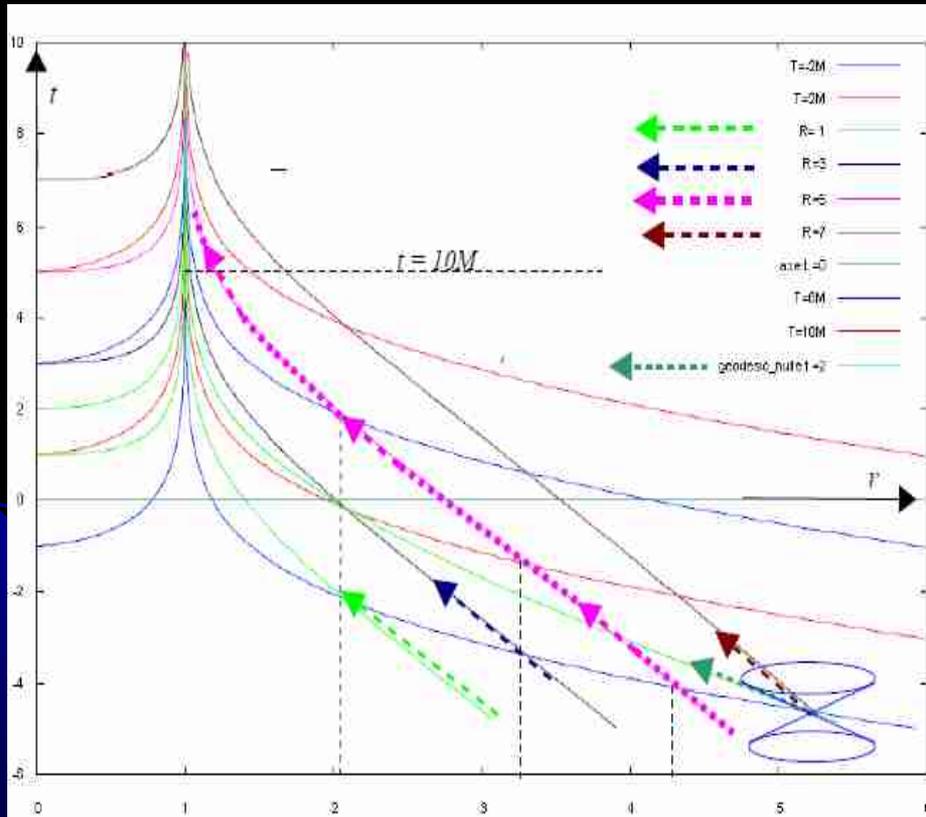


Figure 15-1⁷⁵³. Systèmes de coordonnées représentées dans le plan r, t (Schwarzschild)

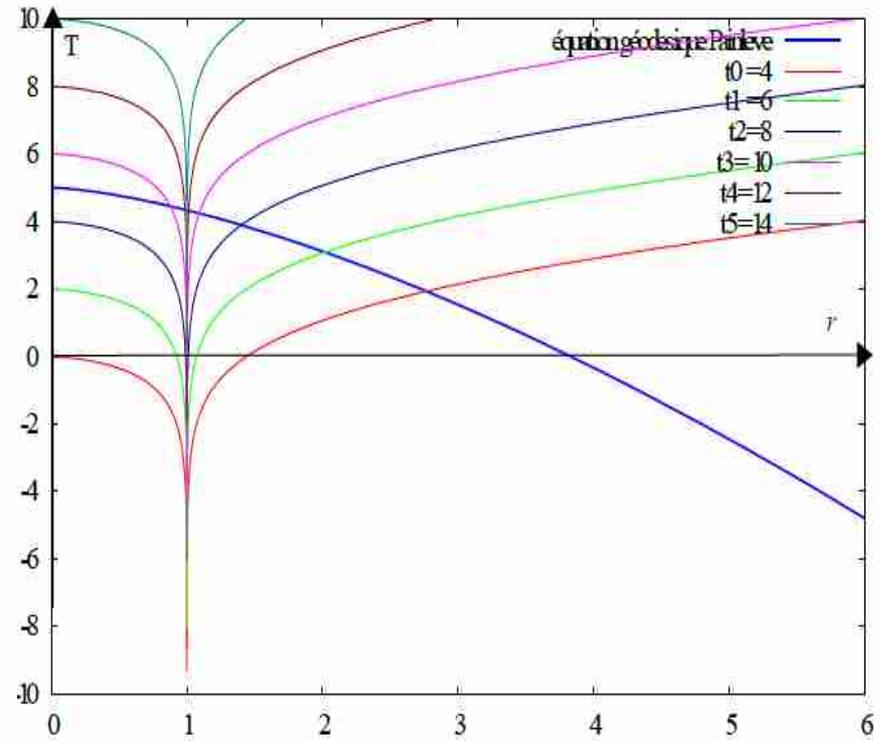


Figure 15-2⁷⁵⁴. Toutes les isochrones du temps t d'un observateur de Schwarzschild, viennent "tangenter" l'horizon en $r=1$. L'isochrone $t = +\infty$ est une droite verticale à $r=1$.

Et puis Lemaitre est arrivé!

En 1932 dans son article « l'Univers en expansion », l'abbé 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!

Bien que religieux (au rang d'évêque), Lemaître a toujours séparé ses activités scientifiques de ses convictions .

L'interprétation moderne

Considérons une boule de matière sans pression interne (ou dont la pression interne est insuffisante pour empêcher son effondrement). Par exemple, on peut imaginer une sphère remplie uniformément de matière froide, réduite en poussière. En théorie newtonienne, l'auto-attraction gravitationnelle de cette boule de poussière va conduire à la faire s'effondrer sur elle-même, jusqu'à ce qu'elle devienne un point, de densité infinie, dans l'espace. En théorie einsteinienne, il se passe quelque chose de complètement différent. En s'effondrant, et donc en se densifiant, la boule de poussière va déformer localement de plus en plus (à cause de l'équation d'Einstein) la structure chrono-géométrique de l'espace-temps. De plus cette déformation évolue elle-même dans l'espace-temps. On démontre alors, qu'à cause de cette déformation grandissante, il se passe deux choses différentes:

- (i) il se crée dans l'espace-temps, autour de la boule et dans son futur, une région d'espace-temps où la chrono-géométrie est si différente de la chrono-géométrie de Poincaré-Minkowski que les rayons lumineux, tout en continuant à se déplacer localement à la "vitesse de la lumière" c , n'arrivent plus à s'échapper et à partir vers l'infini, mais restent éternellement "piégés sur place" par cette structure déformée de l'espace-temps (concept de "surface du trou noir" d'où la lumière ne peut sortir), et
- (ii) en aval de cette structure (dans la direction de l'espace-temps où la boule continue à s'effondrer) l'effondrement de la boule crée un "big crunch", c'est-à-dire l'inverse temporel d'un big bang. Un big crunch est une "fin des temps" dans laquelle tout l'espace intérieur au trou noir cesse d'exister "simultanément" après un temps d'évolution fini (qui est généralement très bref: par exemple pour une étoile de quelques masses solaires qui s'effondre, la fin des temps arrive en environ un millième de seconde).

Finally, the black hole has a triple aspect:

(a) viewed from the exterior it is a center of gravitational attraction that has retained all the gravitational effect of the mass-energy that collapsed,

(b) viewed from the surface it is a sphere where light is stuck (here it is the inverse of the Gurnemann phrase: light goes as fast as possible, but does not arrive to move), and

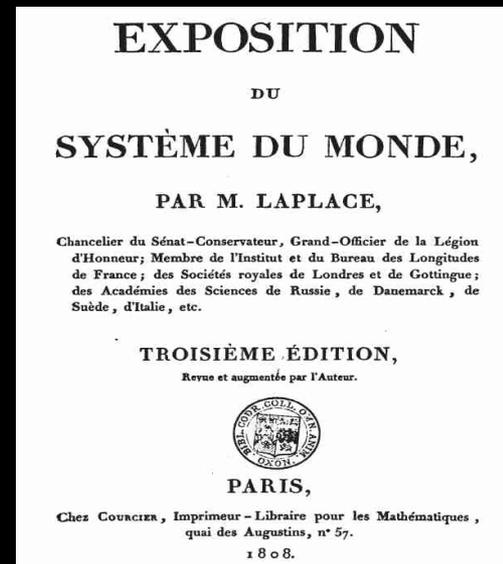
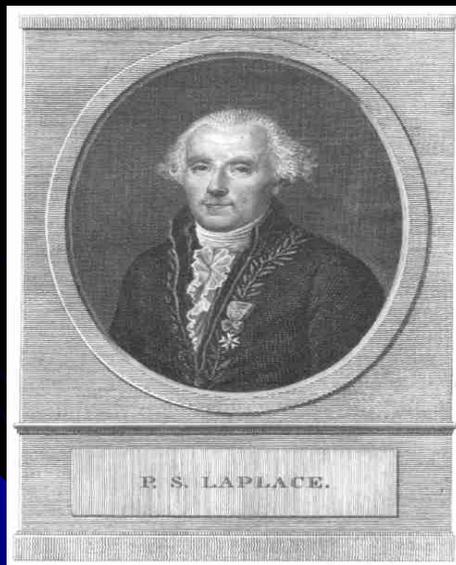
(c) viewed from the interior it is a very rapid time that concerns an infinite volume, although contained in a sphere of finite radius! We do not yet have an absolute observational proof of such objects, which illustrate in a dramatic way the elastic character (up to the tearing in the big crunch) of the Einsteinian space-time, existing in our universe. However, many indirect indications suggest that a very large number of black holes exist in the universe, and even form continuously during the collapse of the most massive stars. The first observational indisputable proof of the existence of black holes will undoubtedly have to wait for the observation of deformation waves of space-time (gravitational waves) generated during the formation of a black hole by the fusion of two dead stars.

Extrait d'une conférence donnée le 1er juillet 2000 dans le cadre de l'Université de tous les savoirs » par T. Damour

03/2003 Les trous Noirs par J. Fric

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)!



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 clairesemée 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»

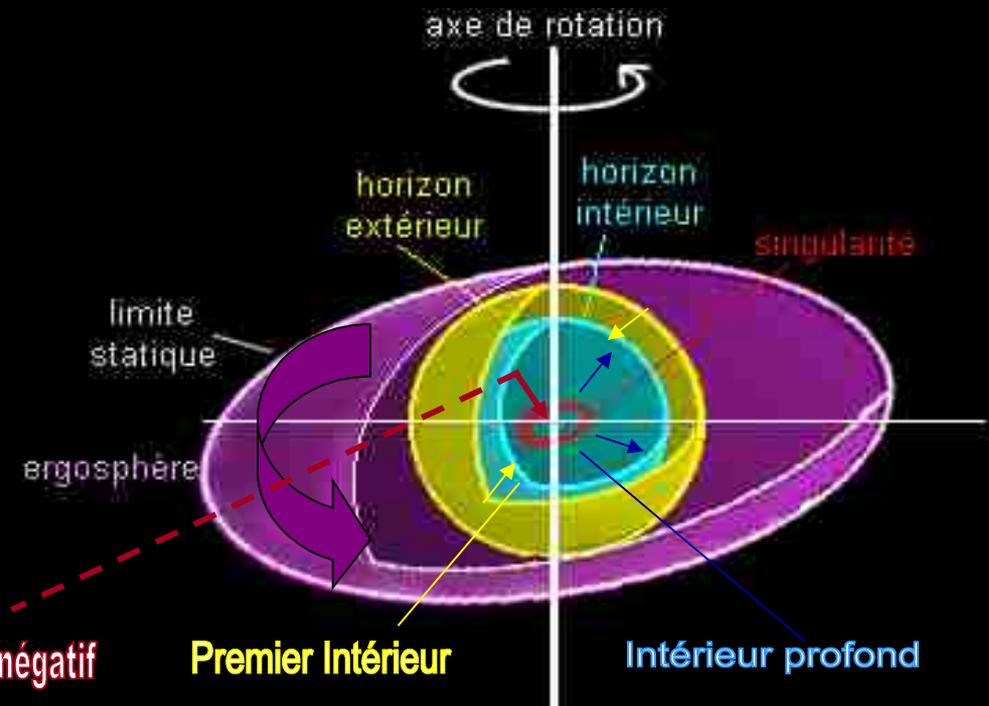
Il a fallu attendre l'apparition de nouvelles méthodes plus formelles (Classification de Petrov, topologie).

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 de l'anneau.

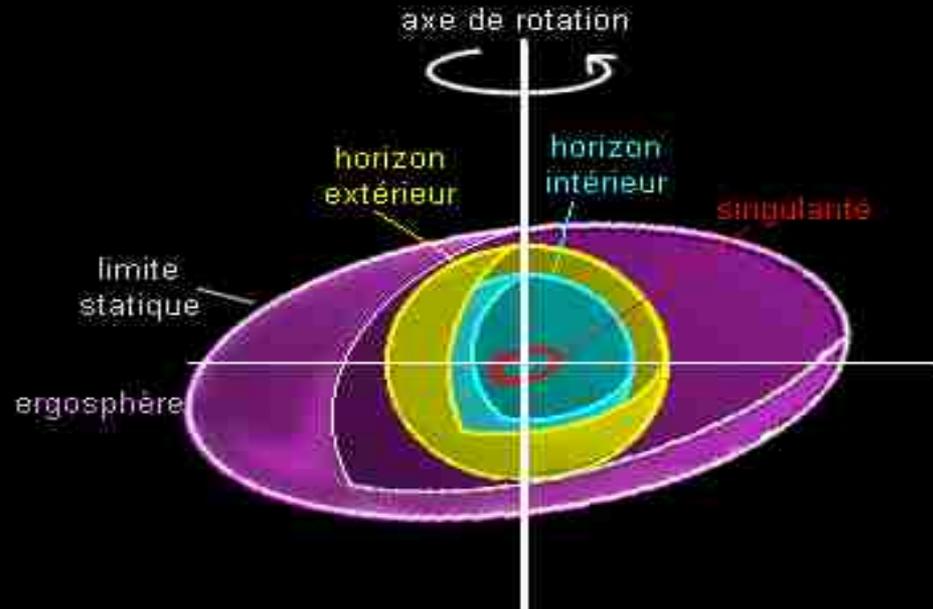


Le trou noir de Kerr

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.

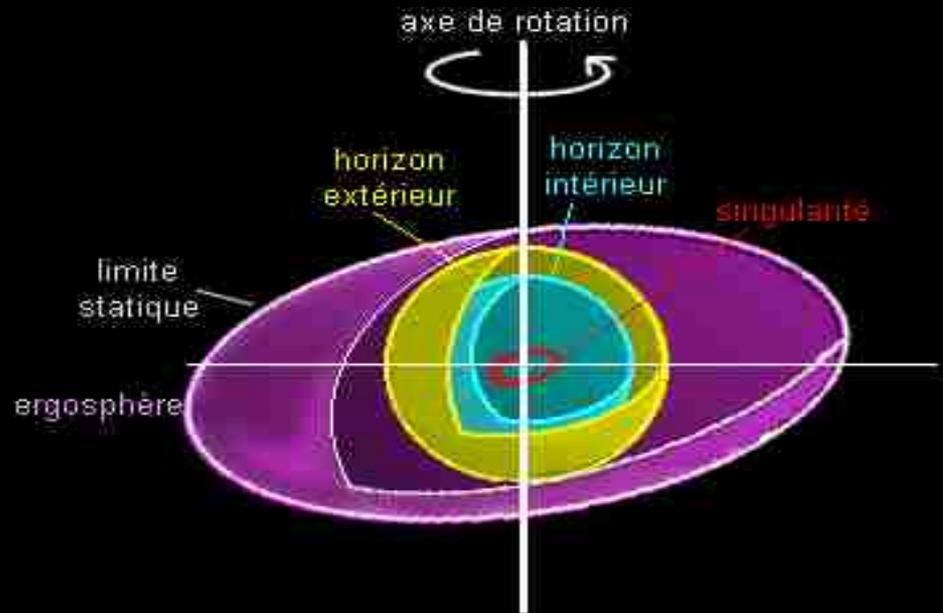
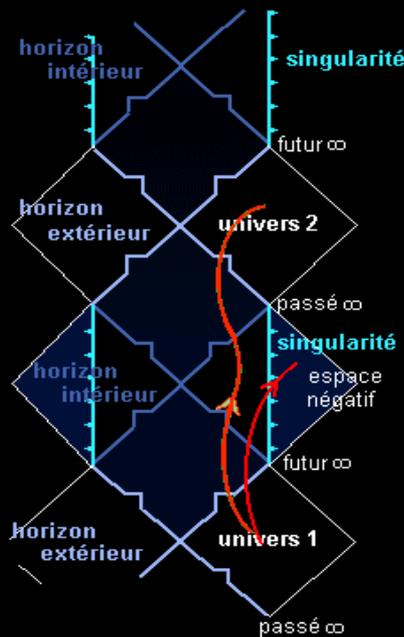
Nouvelle zone :Ergosphère à l'extérieur de l'horizon externe où l'espace est entraîné inexorablement par la « rotation », et dont on peut extraire l'énergie de «rotation» du TN,(maximum 29% cas TN extrémal).

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

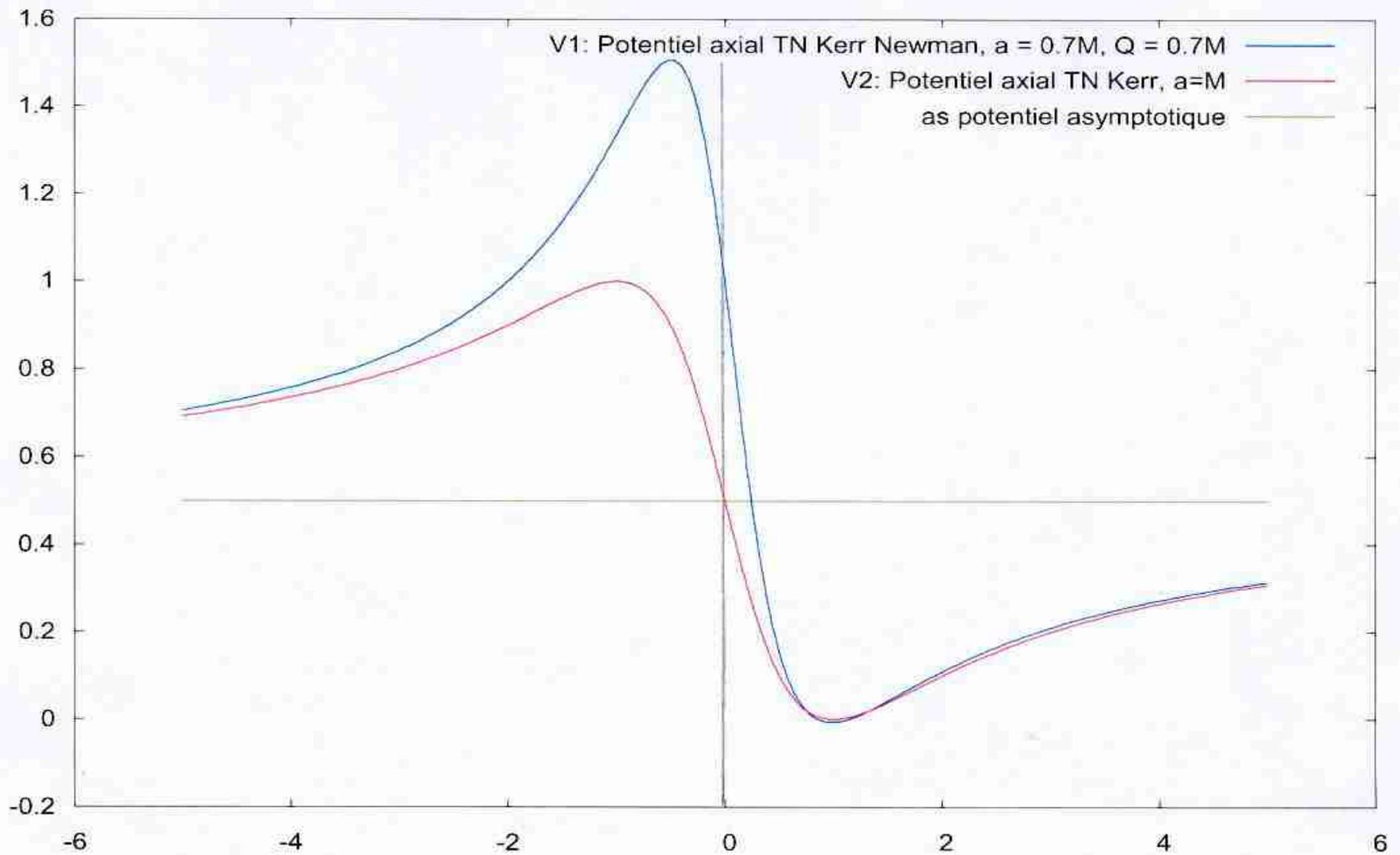


Le TN comme sas vers d'autres univers

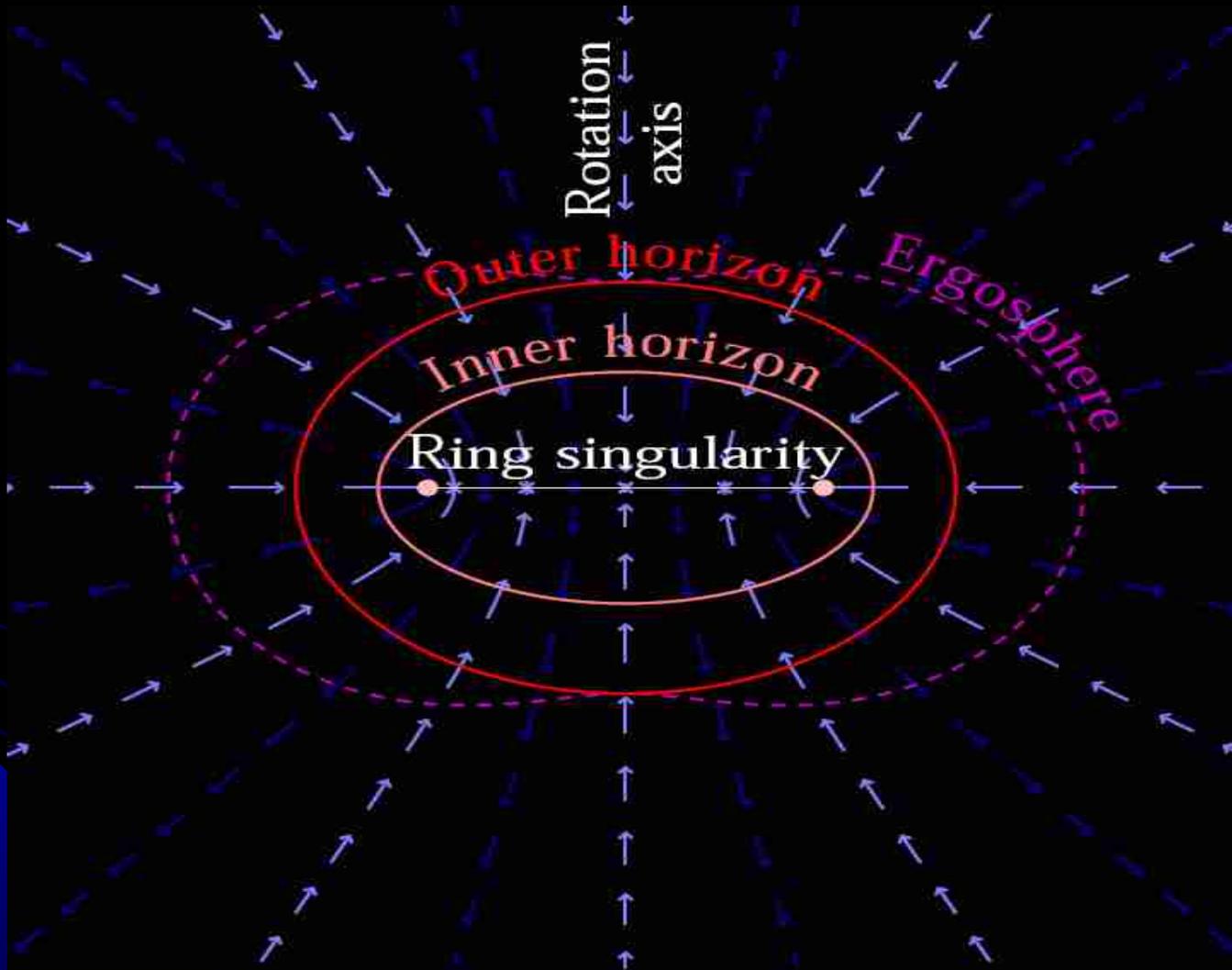
Si on traverse l'horizon extérieur et on continue en étant attiré vers l'horizon intérieur, en le franchissant on a un décalage infini vers le bleu (on voit tout le passé de l'univers en accéléré). A l'intérieur de l'horizon intérieur la singularité devient répulsive et on peut retraverser l'horizon intérieur dans l'autre sens et déboucher vers un autre univers et ainsi de suite.



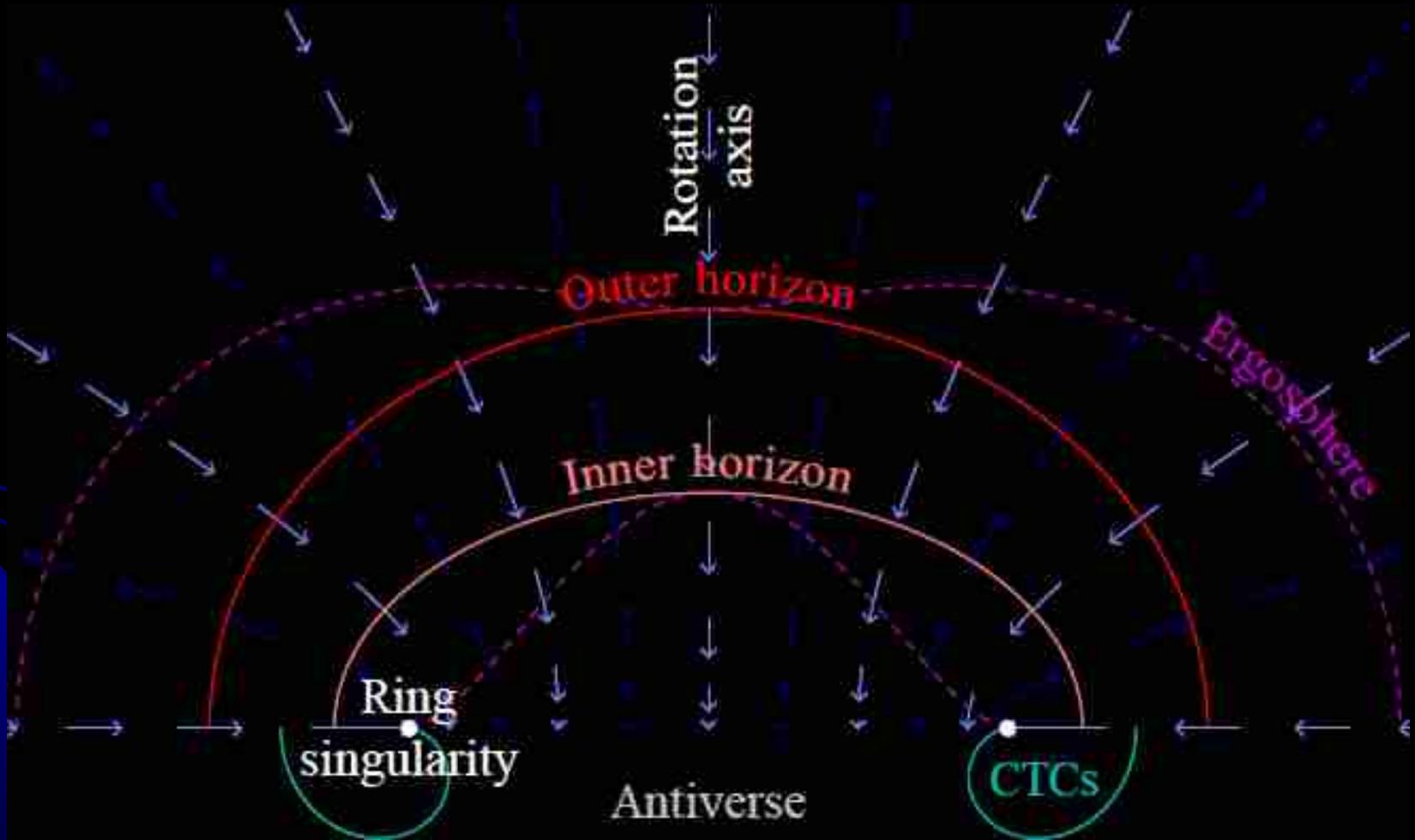
Equation géodésique axiale



Espace-temps de Kerr



Kerr anti-univers



Extraction énergie d'un trou noir

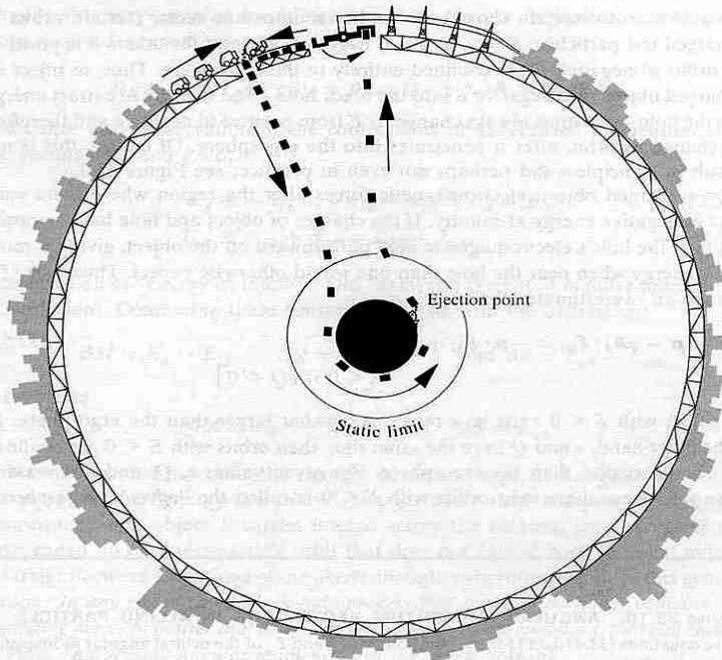


Figure 33.2.

An advanced civilization has constructed a rigid framework around a black hole, and has built a huge city on that framework. Each day trucks carry one million tons of garbage out of the city to the garbage dump. At the dump the garbage is shoveled into shuttle vehicles which are then, one after another, dropped toward the center of the black hole. Dragging of inertial frames whips each shuttle vehicle into a circling, inward-spiraling orbit near the horizon. When it reaches a certain "ejection point," the vehicle ejects its load of garbage into an orbit of negative energy-at-infinity, $E_{\text{garbage}} < 0$. As the garbage flies down the hole, changing the hole's total mass-energy by $\Delta M = E_{\text{garbage ejected}} < 0$, the shuttle vehicle recoils from the ejection and goes flying back out with more energy-at-infinity than it took down

$$E_{\text{vehicle out}} = E_{\text{vehicle + garbage down}} - E_{\text{garbage ejected}}$$

$$> E_{\text{vehicle + garbage down}}$$

The vehicle deposits its huge kinetic energy in a giant flywheel adjacent to the garbage dump; and the flywheel turns a generator, producing electricity for the city, while the shuttle vehicle goes back for another load of garbage. The total electrical energy generated with each round trip of the shuttle vehicle is

$$\begin{aligned} (\text{Energy per trip}) &= E_{\text{vehicle out}} - (\text{rest mass of vehicle}) \\ &= (E_{\text{vehicle + garbage down}} - E_{\text{garbage ejected}}) - (\text{rest mass of vehicle}) \\ &= (\text{rest mass of vehicle} + \text{rest mass of garbage} - \Delta M) - (\text{rest mass of vehicle}) \\ &= (\text{rest mass of garbage}) + (\text{amount, } -\Delta M, \text{ by which hole's mass decreases}). \end{aligned}$$

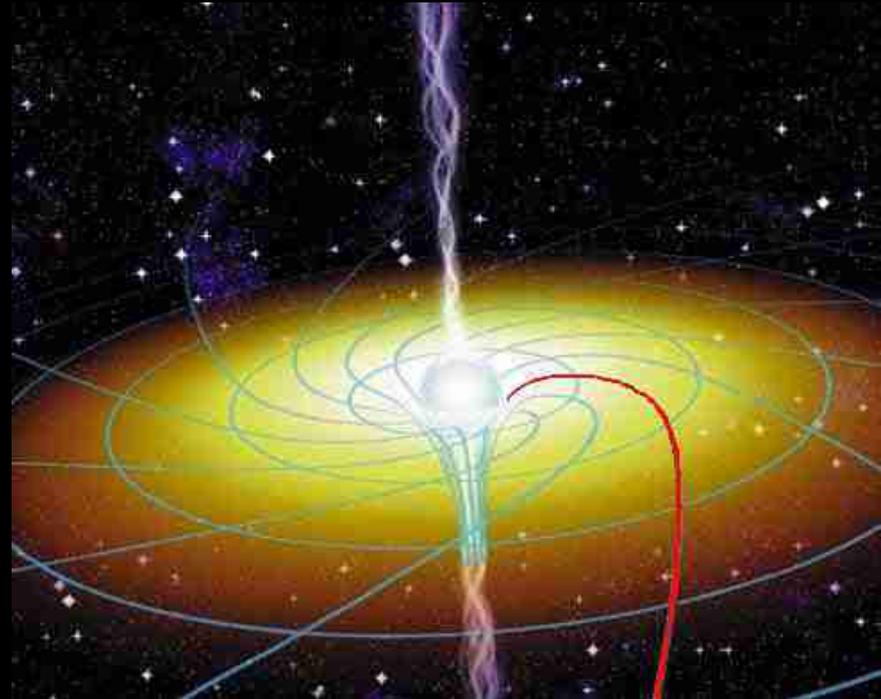
Thus, not only can the inhabitants of the city use the black hole to convert the entire rest mass of their garbage into kinetic energy of the vehicle, and thence into electrical power, but they can also convert some of the mass of the black hole into electrical power!

Autour des TN

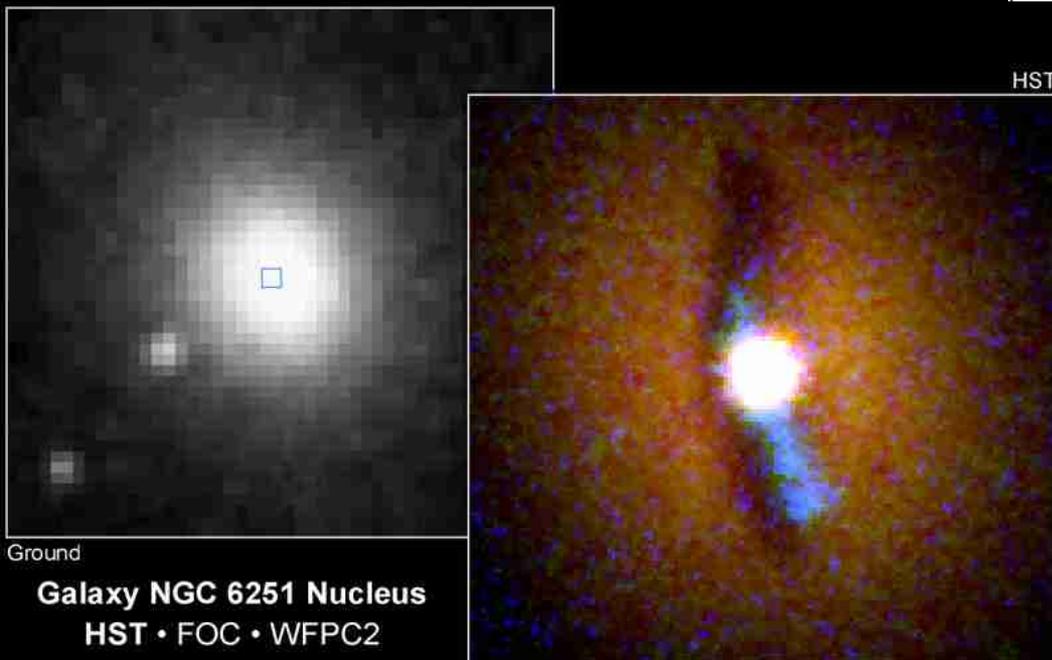
Disques d'**accrétion** : Le TN étant de très petite dimension, la **gravitation est très intense** à proximité immédiate.

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



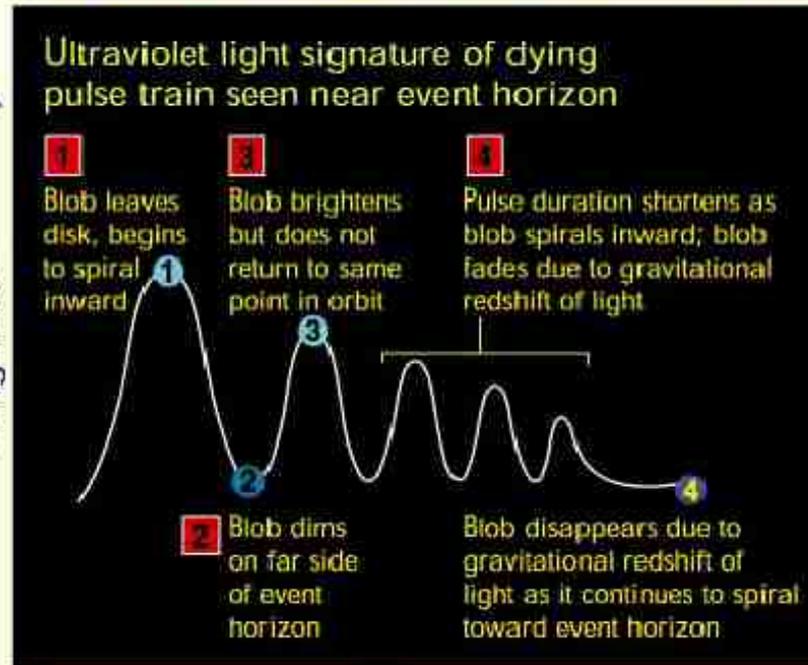
Ground
Galaxy NGC 6251 Nucleus
HST • FOC • WFPC2

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



Signature of piece of matter falling into black hole Cygnus XR-1

Disk of spiraling hot gas
1000-mile gap
Black hole event horizon
Blob of gas breaks off disk to spiral toward event horizon



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

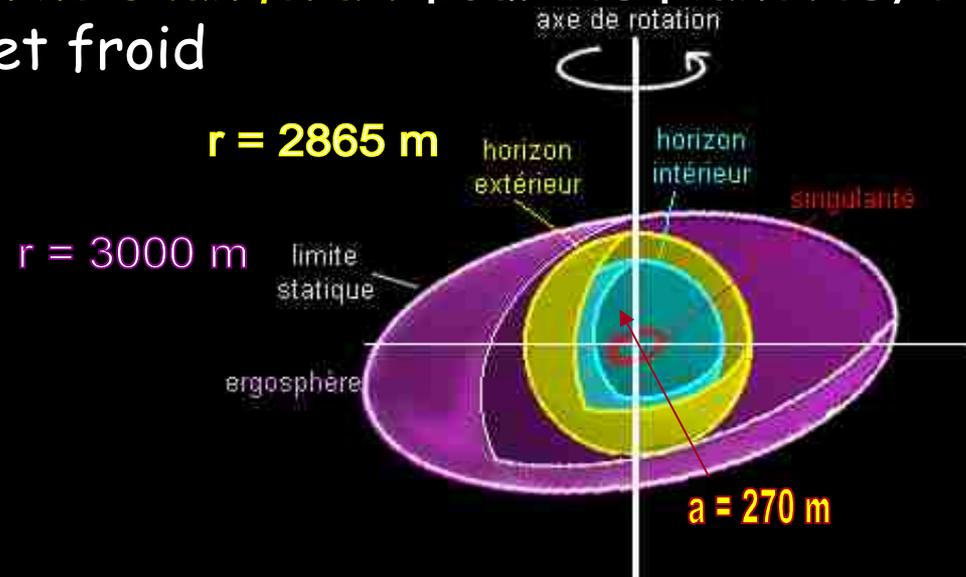


Le rayon r_s serait environ de 3 km.

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

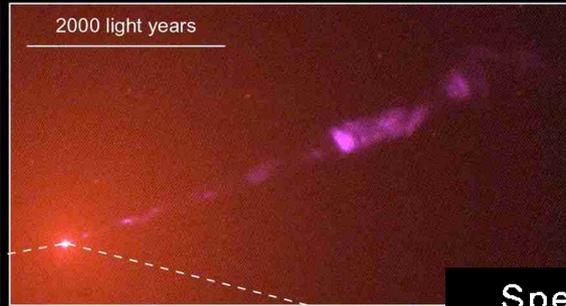
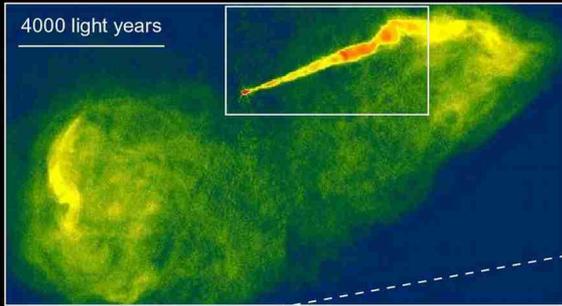


Coordonnées de Boyer Lindquist

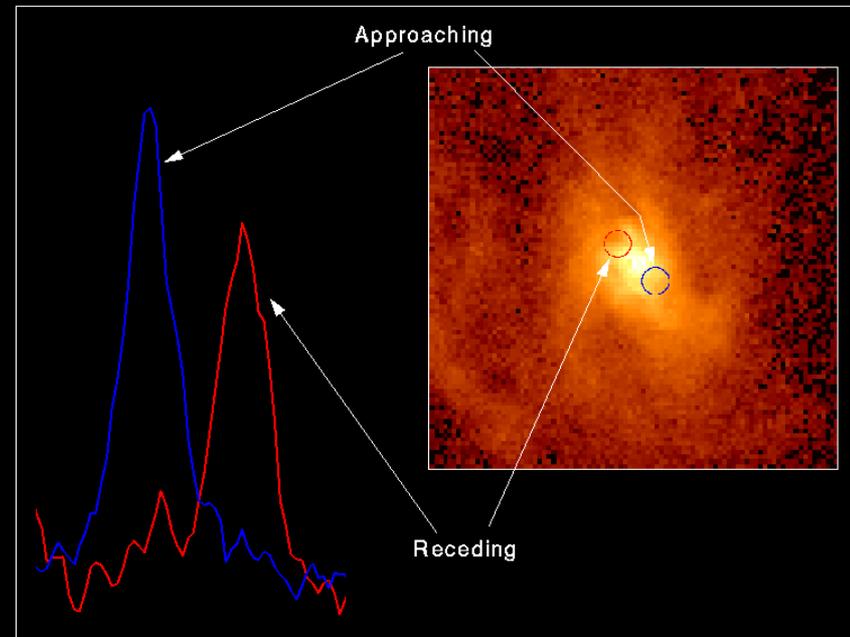
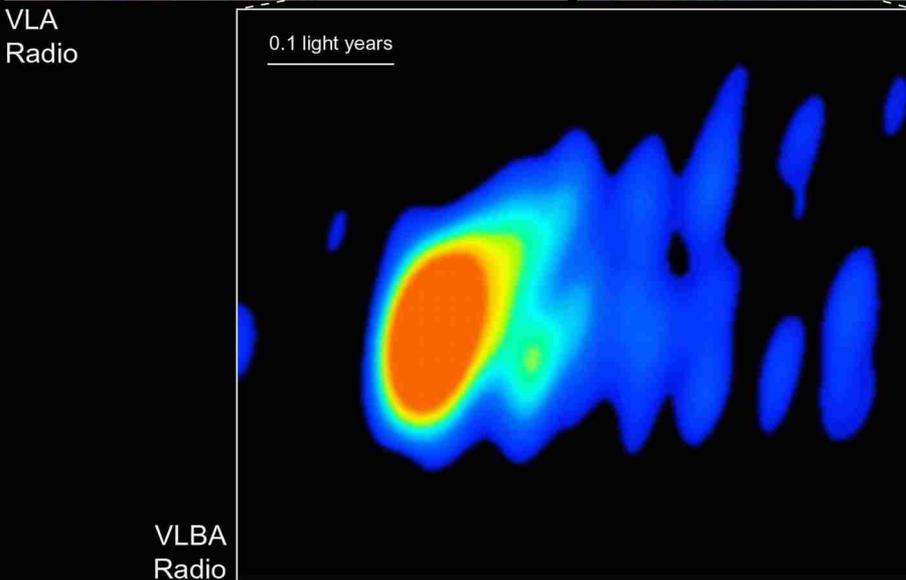
Un hyper trou noir (4 milliards de M_{\odot})

Galaxy M87

Ces trous noirs géants, présents dans le bulbe de la plupart des galaxies, jouent un rôle dans leur formation.



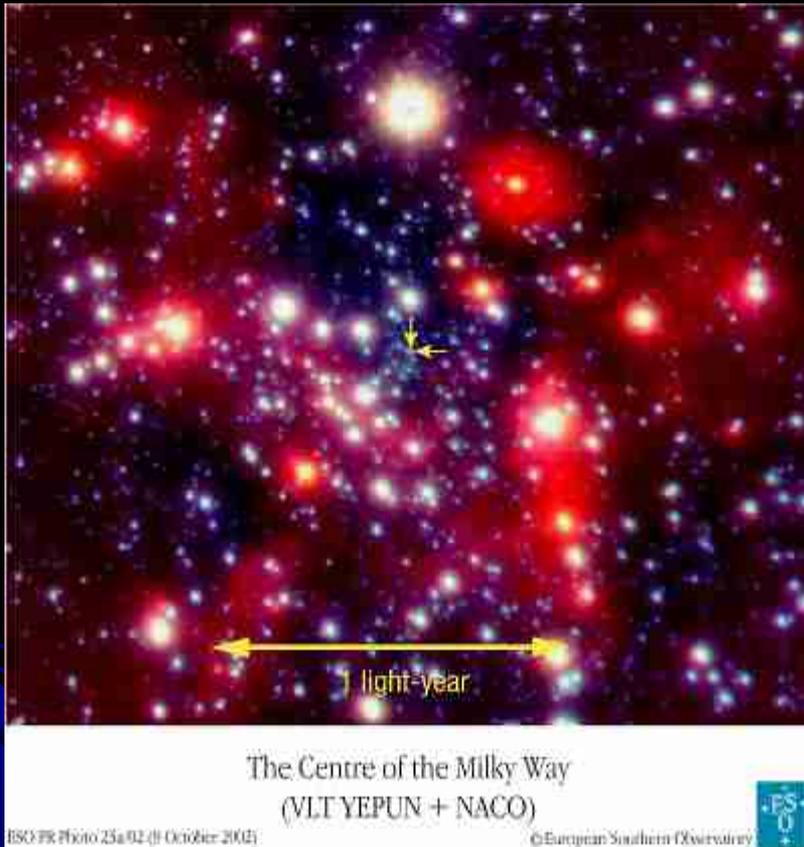
Spectrum of Gas Disk in Active Galaxy M87



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

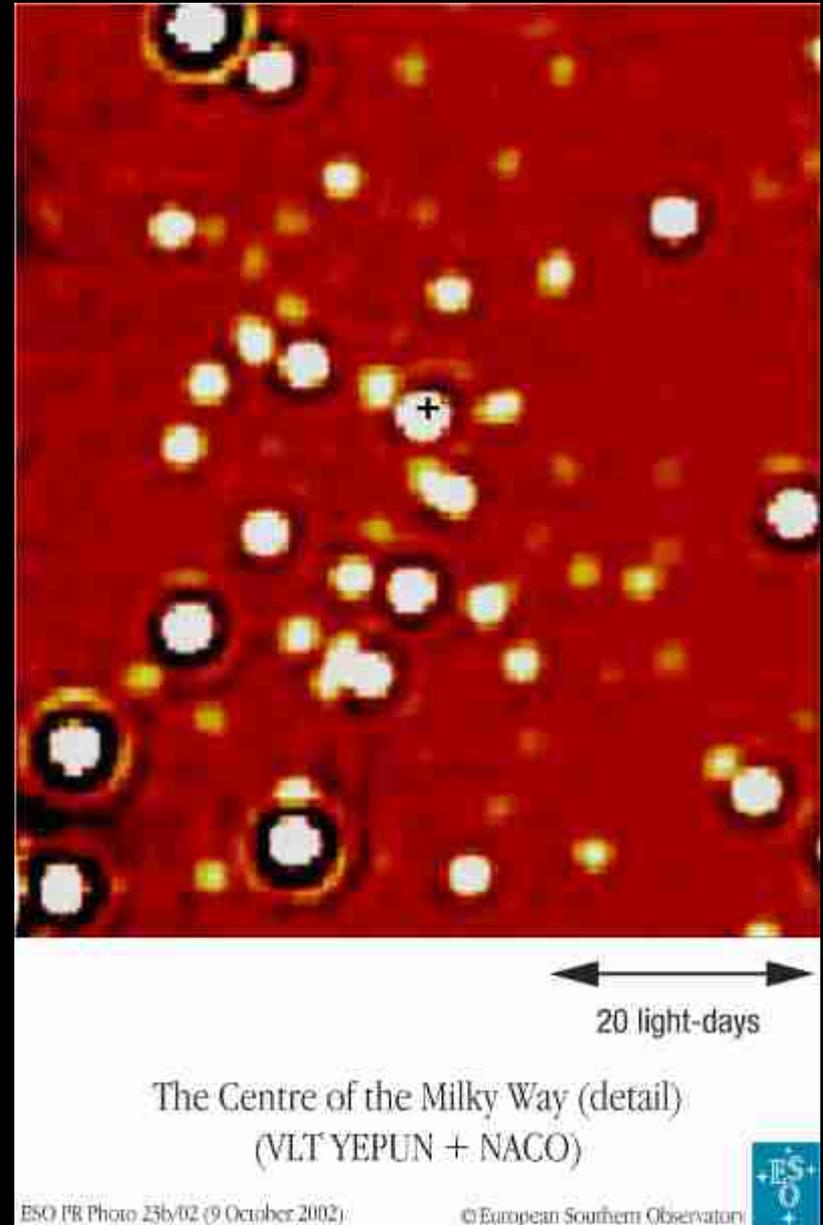
Hubble Space Telescope • Faint Object Spectrograph

Album Trous Noirs



Trou noir supermassif (plusieurs millions de masses solaires) au centre de notre galaxie : Ils jouent un rôle important dans l'univers !

03/2003 Les trous Noirs par J. Fric



Album Trous Noirs

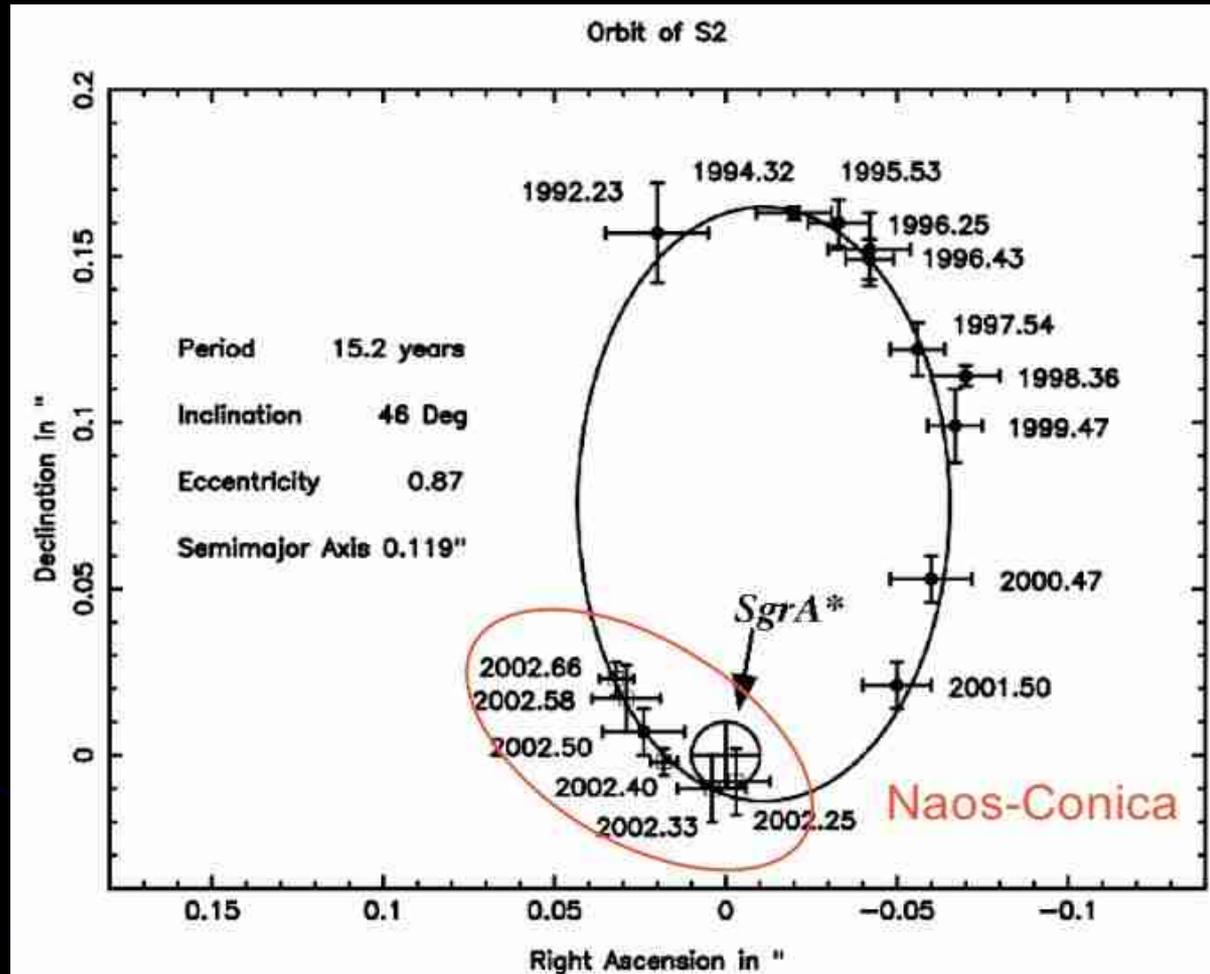


Figure 2. Orbite de l'étoile S2 (ellipse en noir) autour du centre Galactique, c'est-à-dire de Sagittarius A (cercle en noir). La partie entourée de rouge est celle obtenue à partir des observations NAOS/CONICA.*

Dernières nouvelles de notre galaxie

Comme la plupart des grandes galaxies, cette dernière possède en son centre un trou noir supermassif, D'après les estimations, sa masse serait d'environ quatre millions de fois celle du Soleil. En observant ce trou noir supermassif grâce au Very Large Telescope (VLT) de l'Observatoire européen austral (ESO) les astronomes ont observé l'existence d'un nuage de gaz fonçant droit vers le trou noir. Deux ans plus tard, ce nuage dont la masse équivaut plusieurs fois celle de la Terre, est en train de réaliser son plus proche passage à côté de l'ogre supermassif. Une approche dont il ne va pas ressortir totalement indemne. Selon de nouvelles observations faites avec le VLT, le champ gravitationnel extrême qui entoure le trou noir serait en train d'élargir fortement le nuage. "Le gaz au sommet du nuage s'étend maintenant sur plus de 160 milliards de kilomètres autour du point d'orbite le plus proche du trou noir. Et il « frôlera » le trou noir, à tout de même un peu plus de 25 milliards de kilomètres, explique Stefan Gillessen du Max Planck Institute.



03/2003 Les trous Noirs par J. Fric

Importance des trous noirs galactiques

La découverte (récente) de l'existence quasi systématique de trous noirs au centre des galaxies a interpellé les astrophysiciens. Sont ils primordiaux et jouent -ils un rôle dans leur formation où sont-ils simplement un « sous produit » de cette formation ?

Si on a aujourd'hui une meilleure compréhension de cette formation, tous les problèmes ne sont pas résolus.

L'existence de matière noire et d'énergie noire ne simplifie pas le problème pour déterminer la part de chacun dans ce mécanisme. Par ailleurs ils jouent un rôle important dans l'augmentation de l'entropie de l'univers qui régit son destin, puisque les trous noirs sont censés piéger l'information (sujet à de vifs débats).

1963: DECOUVERTE DES PREMIERS « QUASARS »

identification de “radio-sources”

avec des « étoiles » ayant d'intenses raies spectrales
très décalées vers le rouge (“redshift” $Z > 0.1$)

1964: LE DÉCALAGE NE PEUT ÊTRE QUE COSMOLOGIQUE

Les quasars sont donc très éloignés:
des milliards d'années-lumière

Un quasar de $z=6$ (« situé à 12 milliards d'années-lumière »)



Les galaxies aussi brillantes que le quasar
sont bien plus proches que lui

LES QUASARS SONT EN FAIT TERRIBLEMENT PUISSANTS

UN QUASAR ÉMET AUTANT DE LUMIÈRE
QUE 1000 GALAXIES

Mais ils varient rapidement
(en quelques jours, voire quelques heures)

ILS SONT DONC TRÈS “PETITS”

LA TAILLE D'UN QUASAR EST DE L'ORDRE DE
QUELQUES HEURES-LUMIÈRE,
SOIT UN MILLIARDIÈME DE LA TAILLE D'UNE GALAXIE

COMMENT EXPLIQUER UNE SI GRANDE PUISSANCE
DANS UN VOLUME AUSSI PETIT?

Impossible! Disent certains
IL FAUT INVENTER UNE NOUVELLE PHYSIQUE:
"CONTROVERSE DU REDSHIFT"

**POURTANT C'EST POSSIBLE
AVEC UN TROU NOIR**

(Salpeter, Zeldovich, dès 1964)

Mais comment un trou noir peut-il « rayonner »?

**IL "AVALE" LA MATIÈRE QUI L'ENTOURE
ET QUI A UNE VITESSE PROCHE DE LA LUMIÈRE**

**Juste avant d'être engloutie pour toujours
elle rayonne intensément,**

comme une météorite arrivant dans l'atmosphère terrestre

...mais avec une vitesse 10 000 fois plus grande

IL SE CRÉE UN « DISQUE D'ACCRÉTION »
AUTOUR DU TROU NOIR



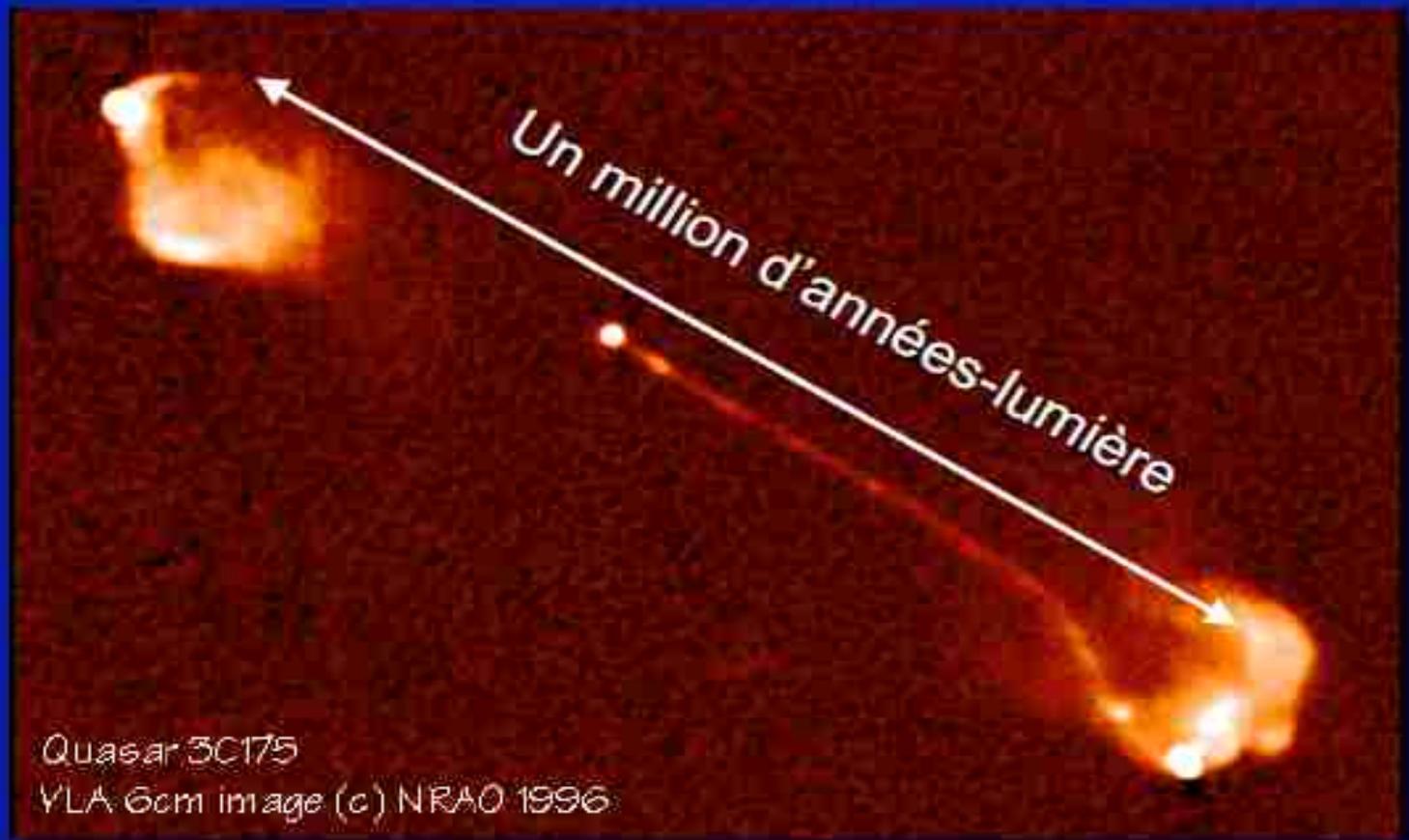
Dessin d'artiste

C'EST LUI QUI DONNE SON ÉCLAT AU QUASAR
IL RAYONNE AVEC UNE EFFICACITÉ POUVANT
ALLER JUSQU'À 30% DE MC^2

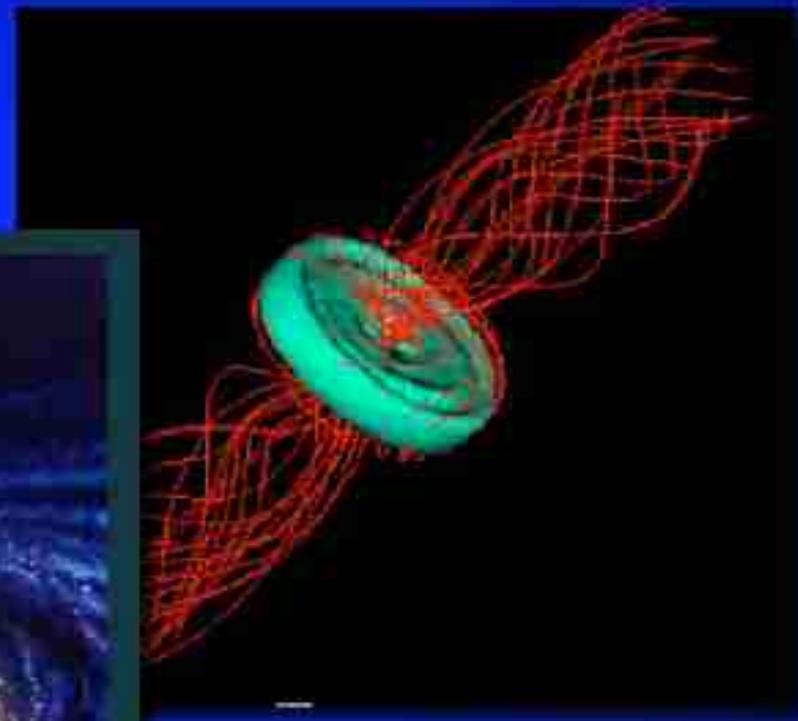
On calcule que
la puissance générée est celle de 1000 galaxies
pour une taille de quelques heures-lumière

(Équilibre entre la force gravitationnelle et la pression de radiation)

Carte radio d'un quasar:



Radio-galaxies et TNSM radio



Voir un trou noir sur fond d'étoiles

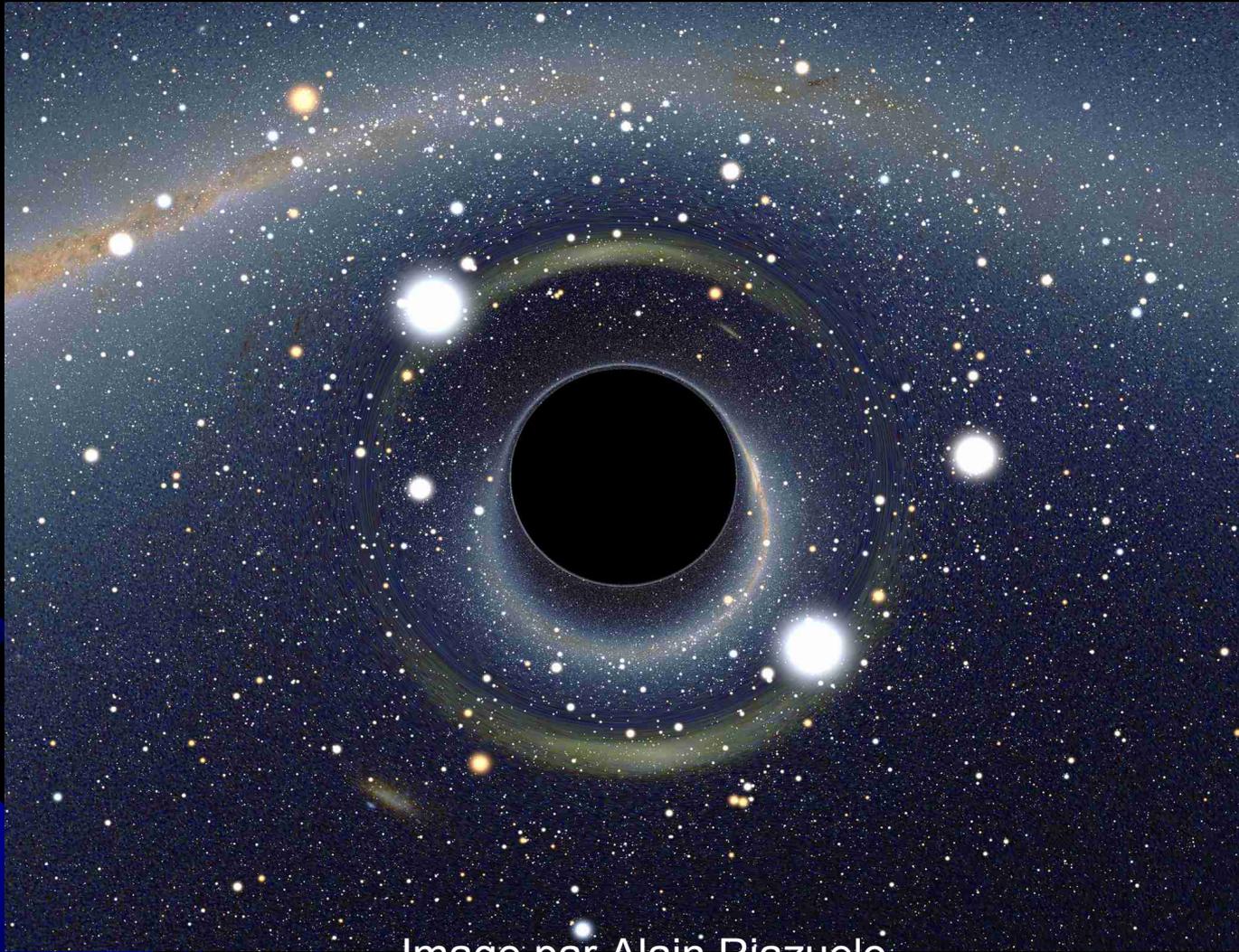


Image par Alain Riazuelo.

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 $5 \cdot 10^9 \text{ km}$).

Plongée dans un trou noir



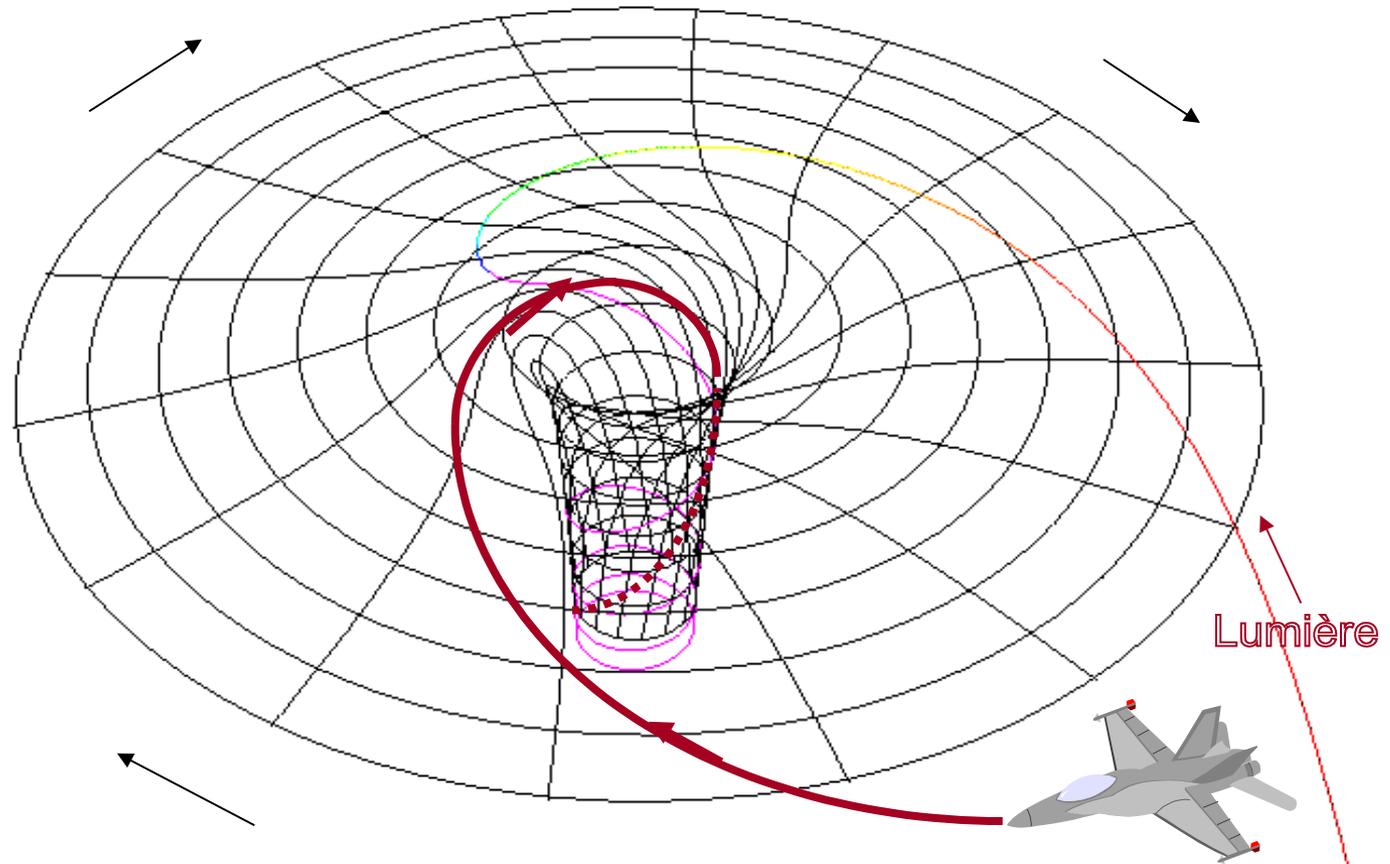
Chute libre TN de Kerr: pôles

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

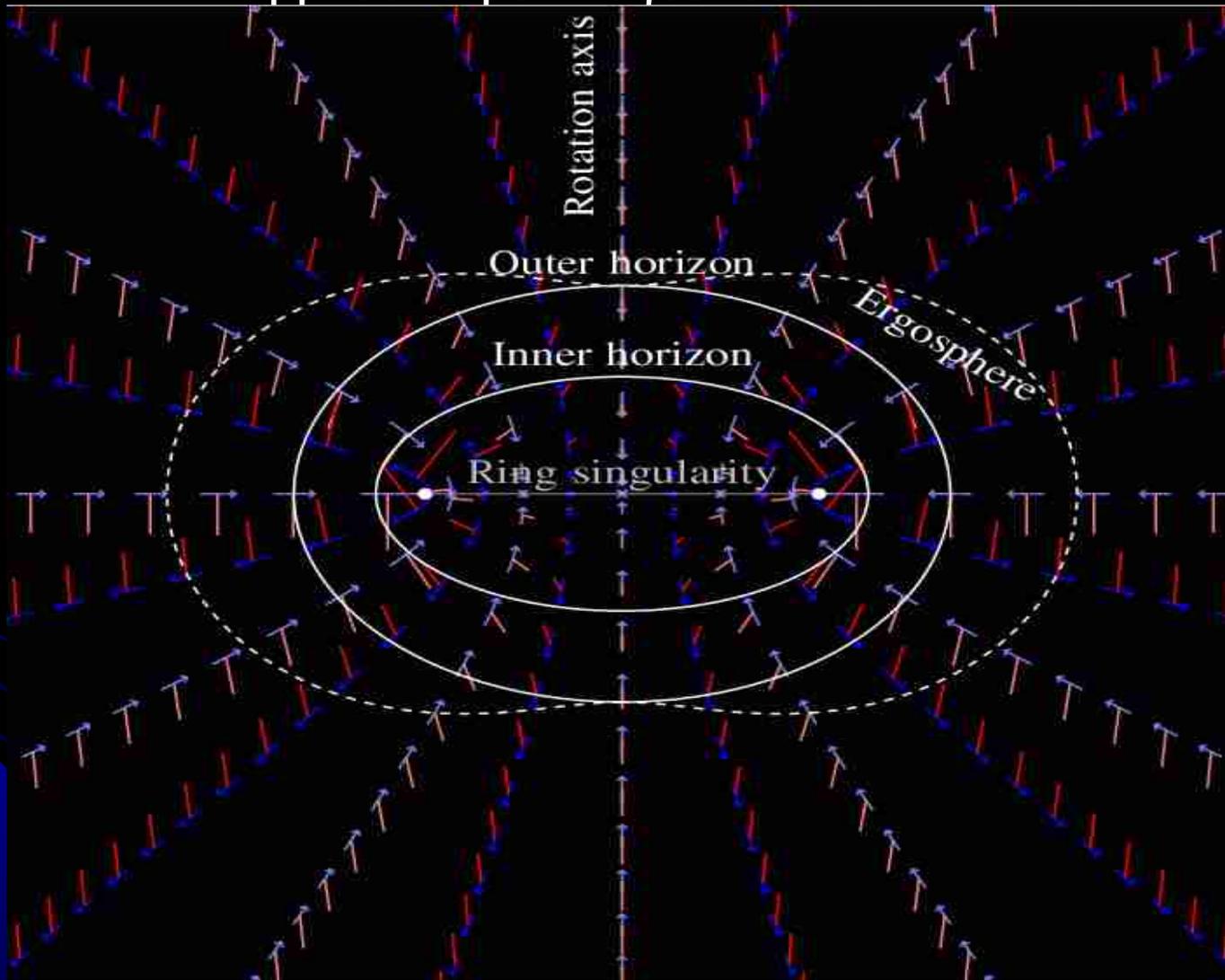
Approche par l'équateur: On tourne!



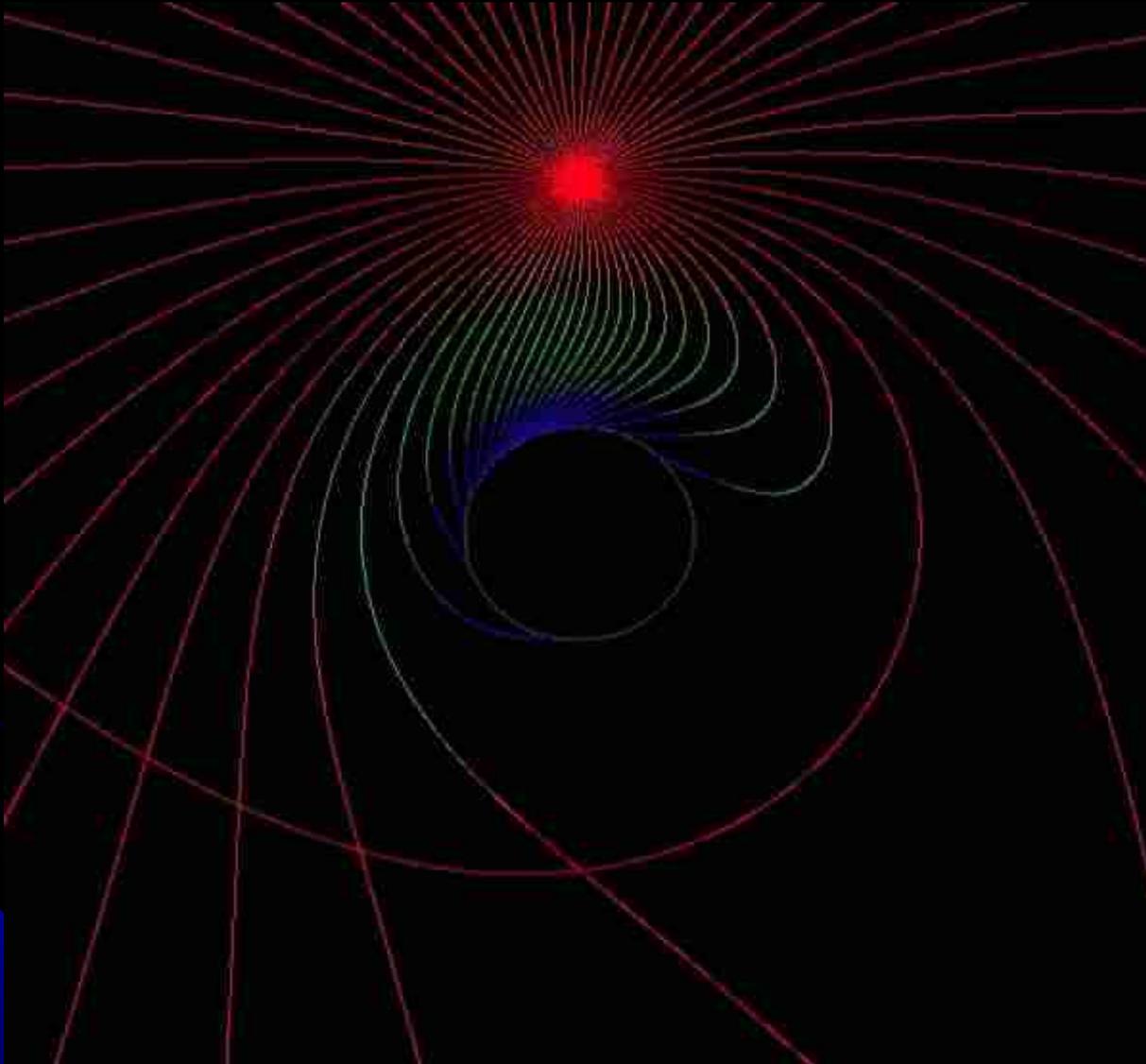
Trou noir de Kerr Extrémal

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 : $T \approx 10^{-7} (M_s/M)^\circ K$.
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!**

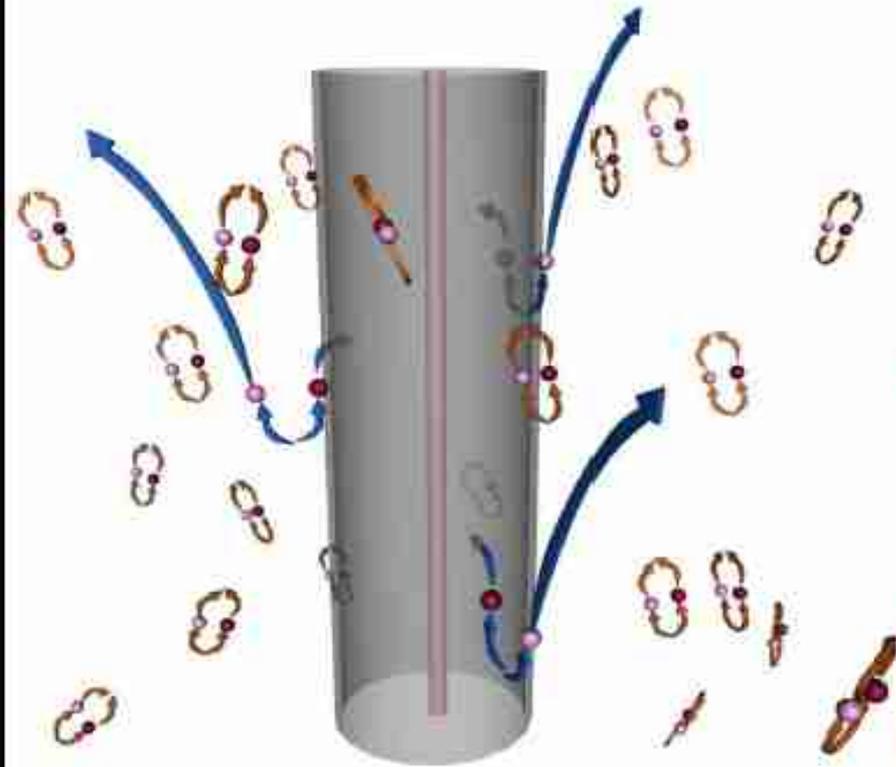
Domestiqués, ces TN sont les réservoirs d'énergie libre les plus importants de l'Univers

- 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 a pu **générer toutes les particules** de l'Univers à partir de « rien » (S. Hawking)

Rayonnement de Hawking

Zeldovitch 1971, Hawking 1974, 1975



[<http://library.thinkquest.org/>]

Étude des **fluctuations du vide** au voisinage d'un trou noir (théorie quantique des champs en espace courbe^{a)} :

création de paires de particules virtuelles près de l'horizon

⇒ le trou noir rayonne comme un **corps noir** à une température proportionnelle à

la gravité de surface : $T = \frac{\hbar}{2\pi k} \kappa$

t.n. de Schwarzschild : $\kappa = c^3/4GM \Rightarrow$

$$T = \frac{\hbar c^3}{8\pi Gk M} = 6.1 \cdot 10^{-8} \left(\frac{M_{\odot}}{M} \right) \text{ K}$$

a. le champ gravitationnel n'est pas quantifié : il est classique

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.

Le trou noir en relativité générale

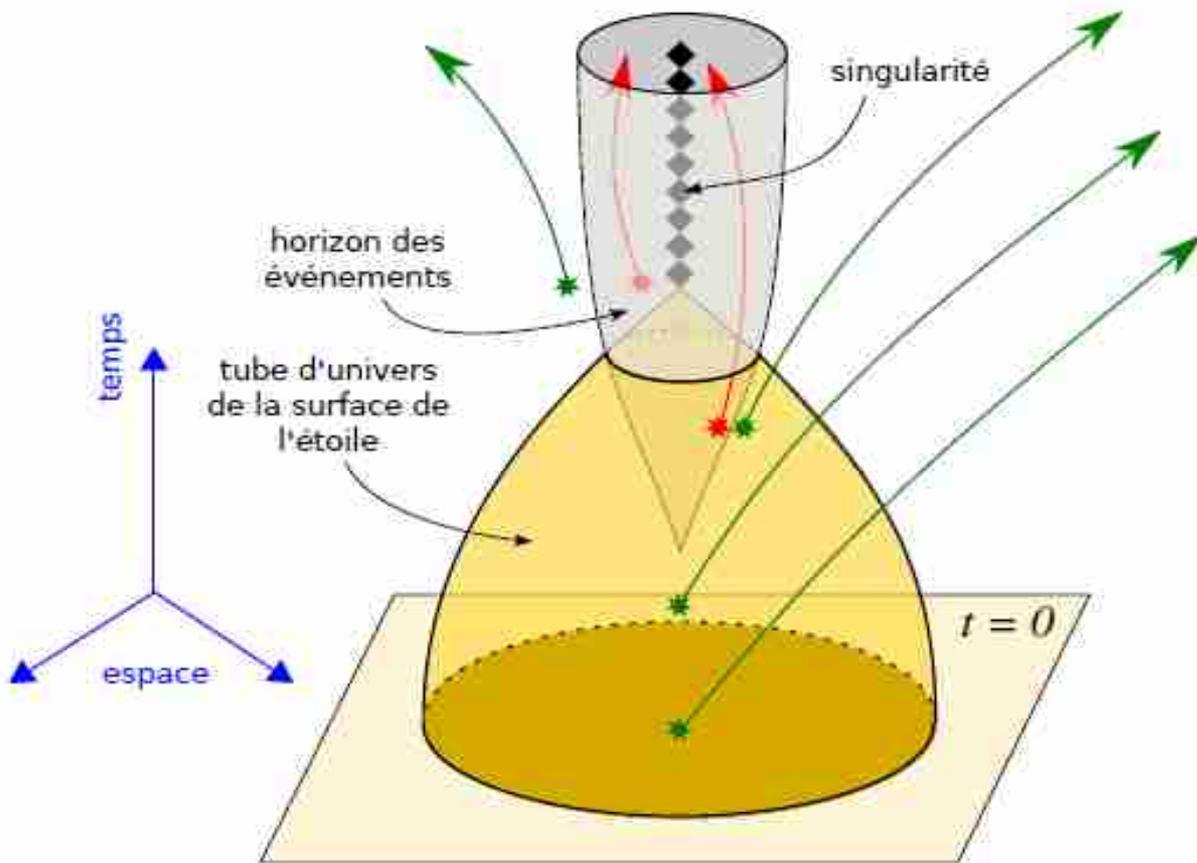


Diagramme d'espace-temps montrant la formation d'un trou noir par **effondrement gravitationnel** d'une étoile

Un **trou noir** est une région de l'espace-temps d'où les photons ne peuvent sortir pour atteindre des régions infiniment éloignées.

La frontière (immatérielle) \mathcal{H} entre le trou noir et le reste de l'univers est appelée **horizon des événements**. Il s'agit d'une partie tridimensionnelle de l'espace-temps (*hypersurface*).

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 **hypermassifs** de l'ordre du milliard de masse solaires (M87).

• Trous noirs **supermassifs** du million de masses Solaires (centre Voie Lactée).

Trous noirs **Stellaires**, de quelques masses solaires.

Minitrous Noirs : Durée de vie & mode de formation ?

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.

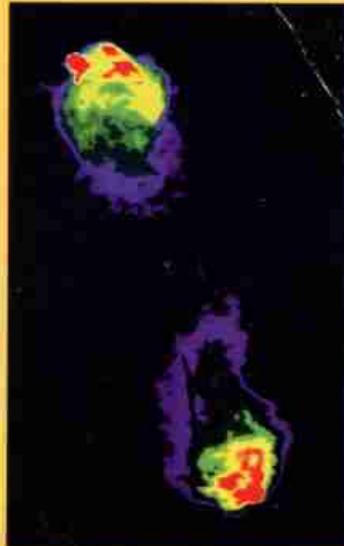
Autres références: Luc Blanchet*: Introduction à la Relativité Générale (chapitres 10 et 11 en particulier), Alain Riazuelo conférence à la SAF.

* références des sites sur notre site

THORNE

TROUS NOIRS ET DISTORSIONS DU TEMPS

Préface de Stephen Hawking



Champs
Flammarion

Trou noir fiscal

