

# L'insoutenable attractivité des trous noirs

Qui sont ces étranges objets ?

Quelle physique leur donne naissance ?

Petit tour d'horizon sur leur place & leur rôle dans notre Univers

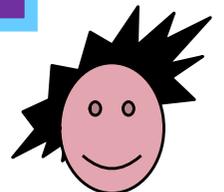
*Bertrand Chauvineau*

Université Côte d'Azur / Observatoire de la Côte d'Azur

UMR Lagrange

chauvineau@oca.eu

... avec la participation de ...  
... et ses copains ...



# But(s) de cet exposé

## 1 – **Tout un monde relativiste ... jusqu'à quel point ?** (10/11 slides)

Relativité ...? Oui, mais de quoi ?

Ce que nous a appris la lumière (des vues Newtoniennes à la Relativité Restreinte)

## 2 – **La gravitation : des vues Newtoniennes à la Relativité Générale** (4 slides)

Newton & la gravitation

Une autre description de la gravitation : la Relativité Générale

→ Observations & succès de la RG

## 3 – **De bien étranges solutions : les trous noirs** (7/9 slides)

L'apport de Schwarzschild : que décrit sa solution ?

Les trous noirs : compliqués, mais simples (ou le contraire)

Quelques confusions (trop courantes ...) à éviter !

Quelques propriétés

## 4 – **... Et l'astrophysique dans tout ça ?** (7 slides)

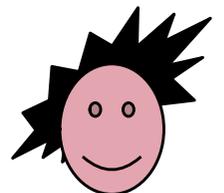
Du statut d'objet hypothétique à celui d'objet incontournable (pour l'astronome)

Les TNs : d'où viennent-ils ?

Que font-ils ? Leur différents rôles/interactions avec les objets de l'Univers

Catalyseurs de vitesse/éjection

... avec la participation de ...



# 1 – Tout un monde relativiste ... jusqu'à quel point ?

## Relativité ... ok, mais de quoi ?

Quelques faits d'**expérience « quotidienne »**, et ce qu'ils nous **apprennent** ou **suggèrent** (distinguer les 2 mots !):

- quand deux événements ont lieu (le lancer d'un caillou, puis sa chute au sol), **l'intervalle de temps entre ces deux événements est le même pour tout le monde** (exp quotidienne)
  - bien évidemment, ceci ne peut être qu'une **suggestion**, car être affirmatif (au sens strict) demanderait de faire des **mesures d'intervalles de temps** (nous laissons de côté le problème de la mesure lui-même et son sens) avec une **précision infinie**
- quand un corps se déplace, **sa vitesse dépend de l'observateur qui la mesure** (si une voiture se « déplace à 60 km/h » sur une route, cela veut dire qu'elle a cette vitesse pour un obs au repos sur cette route ; par contre, elle se déplace à (semble-t-il) 100 km/h par rapport à un obs se déplaçant sur cette route à 40 km/h, mais en « sens inverse »)
  - il s'agit bien là d'une « **véritable connaissance** », car accroître la précision de cette mesure ne **changera évidemment pas cette conclusion** (relativité de la vitesse)
  - par contre, le fait que cela soit vrai pour cette voiture **ne signifie pas que cela sera vrai pour tous les corps** imaginables. Le supposer, c'est **faire une hypothèse généralisatrice**, (plus ou moins) **suggérée** par des expériences particulières

**Toute la physique, jusqu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle s'est construite en faisant** (implicitement) **l'hypothèse que les suggestions précédentes sont exactement vraies.** (Autrement dit, en considérant qu'elles nous donnent accès à une véritable connaissance.)

L'élaboration de cette physique « classique » a donc demandé **(1)** :

- de faire préalablement une « **théorie de l'espace-temps** » (Newton), basée sur une **axiomatique permettant de prouver** les suggestions précédentes, et affirmant (**axiomes ou preuves**)

notamment :

\* l'**espace** dans lequel nous vivons est « **Euclidien** » (**axiome**)

→ toutes les propriétés de la géométrie élémentaire enseignée au collège/lycée

\* **temps** : sa mesure est « **absolue** » (**axiome**)

→ l'intervalle de temps entre 2 évts est **strictement indépendant** de l'observateur

→ possibilité de synchroniser *définitivement* des horloges

\* **les vitesses** de tous les corps dépendent de l'observateur (**conséquence prouvable**)

→ loi classique de *composition additive* des vitesses

**!!!!!! Vitesse : module (km/h) et direction !!!!!!**

\* **mouvements inertiels** : un corps ne subissant *aucune action extérieure* (aucune « force ») conserve sa vitesse (**conséquence prouvable**)

→ mouvements rectilignes & uniformes

... et ensuite **(2)** :

- d'élaborer, **dans ce cadre spatio-temporel**, une **théorie du mouvement des corps** (Newton, encore ...) permettant de dire comment un corps « réagit » à une sollicitation (force) donnée

( suite ... → )

- d'élaborer, toujours dans ce cadre spatio-temporel, des théories physiques destinées à rendre compte des phénomènes observés dans la nature : lumière, chute des corps, phénomènes électriques & magnétiques, échanges de chaleur et d'énergies diverses, écoulement des fluides, mouvements célestes, ...
- ... la théorie de la Gravitation Universelle (Newton, encore et toujours ...) étant l'une de ces théories, qui permet de comprendre : (1) le phénomène de chute des corps, (2) les mouvements des corps célestes
  - une seule interaction (gravitation) pour comprendre des phénomènes d'apparences très différentes
    - 1<sup>er</sup> exemple de « théorie unificatrice »
- ... et il faudrait ajouter, en amont de tout cela : les mathématiques, essentiellement le calcul différentiel & intégral (Leibnitz et ... Newton !!!) permettant de mettre tout cela en oeuvre (comprendre : donner à ces théories un pouvoir opérationnel & quantifiable, donc prédictif)

→ Qu'est-ce qui est « relatif », dans ce cadre ? (c'est-à-dire : dépend de l'observateur)

- aucune notion de « relativité du temps », le temps étant absolu (hypothèse fondatrice essentielle dans l'axiomatique de Newton)
- la cinématique (vitesses) est complètement relativiste, puisque aucune vitesse (ni aucune de ses composantes, donc pas son module) n'est indépendante de l'observateur qui la mesure

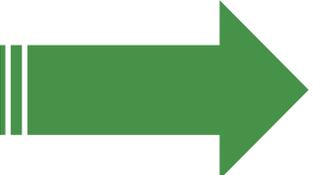
Pour être complet : Maxwell, au cours du XIX<sup>ème</sup>, a proposé une théorie électromagnétique

- qui interprète en une théorie unique les phénomènes électriques & magnétiques  
→ théorie unificatrice
- et qui (bonus !) interprète la lumière comme un phénomène électromagnétique

**Newton + Maxwell** : un cadre complet pour (à peu près) toute la physique ... de cette époque !!!



Notions *thermodynamiques*  
(irréversibilité de certains phénomènes, ...)



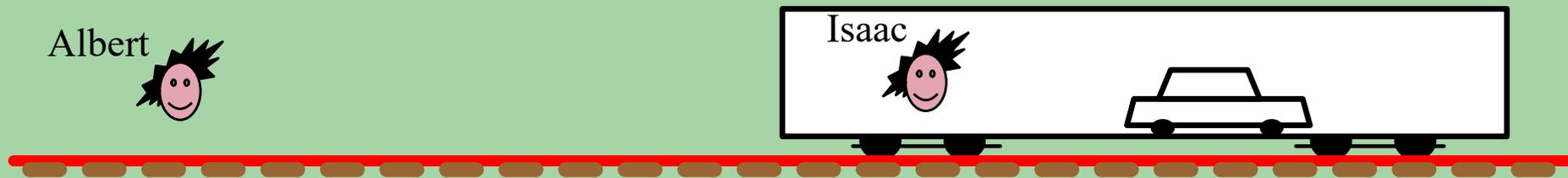
Ceci définit à peu près tout l'enseignement de physique que reçoivent les étudiants des CPGE, ou de 1<sup>ère</sup> & 2<sup>ème</sup> année de licence scientifique (L1, L2) :

- **mécanique** / du point, du solide, (un peu) des fluides ...
- l'**électromagnétisme**, avec l'optique comme produit dérivé (même si pas abordée dans cet esprit au début)
- la **thermodynamique**
- et (parfois) une petite introduction aux effets quantiques et relativistes, mais plus comme sensibilisation (prend une place plus importante à partir de la L3 ... et bien sûr dans les « masters » de physique/astrophysique)

## Retour sur la composition (additive dans l'esp-tps de Newton) des vitesses

En travaillant dans ce cadre Newtonnien, la façon dont se « composent » les vitesses est illustrée sur cet exemple :

Soient un train en mvt, et un objet (voiture) en mvt dans le train



- Isaac (assis dans le train) mesure la vitesse de la voiture dans le train  $\rightarrow v_{voiture}^{(I)}$
- Albert (immobile sur le quai) mesure la vitesse du train sur les rails  $\rightarrow v_{train}^{(A)}$
- Albert (...) mesure aussi la vitesse de la voiture par rapport aux rails  $\rightarrow v_{voiture}^{(A)}$

**Question :** quelle **relation** (exacte !) existe-t-il **entre ces 3 vitesses ?**

**Espace-temps de Newton**  $\rightarrow$

$$v_{voiture}^{(A)} = v_{train}^{(A)} + v_{voiture}^{(I)}$$

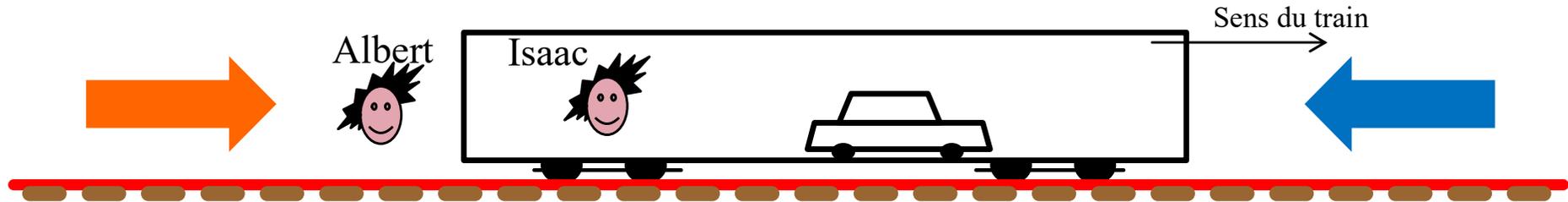
$$\left( \vec{v}_{voiture}^{(A)} = \vec{v}_{train}^{(A)} + \vec{v}_{voiture}^{(I)} \right)$$

$$v_{voiture}^{(I)} = 10 \text{ km/h} \quad \& \quad v_{train}^{(A)} = 40 \text{ km/h} \quad \rightarrow \quad v_{voiture}^{(A)} = 50 \text{ km/h}$$

$$v_{voiture}^{(I)} = 10 \text{ km/h} \quad \& \quad v_{train}^{(A)} = 300 \text{ km/h} \quad \rightarrow \quad v_{voiture}^{(A)} = 310 \text{ km/h}$$

$\rightarrow$  ... conclusion n'ayant **rien à voir avec la nature des objets en mouvement !!!**

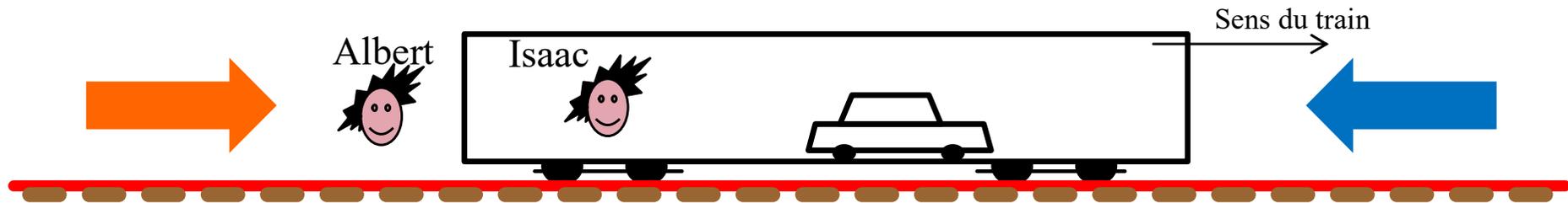
- ... rien à voir avec la nature des objets en mouvement, c'est-à-dire que :
- si la lumière se déplace à une vitesse  $c$  (disons 300.000 km/s) par rapport au quai/Albert
  - que le train se déplace à une vitesse  $v$  (disons 100 km/h) par rapport au quai/Albert
  - alors la lumière se déplace à la vitesse  $c+v$  par rapport au train/Isaac si le train va « à la rencontre » de la lumière ( $c-v$  si la lumière « rattrape » le train)



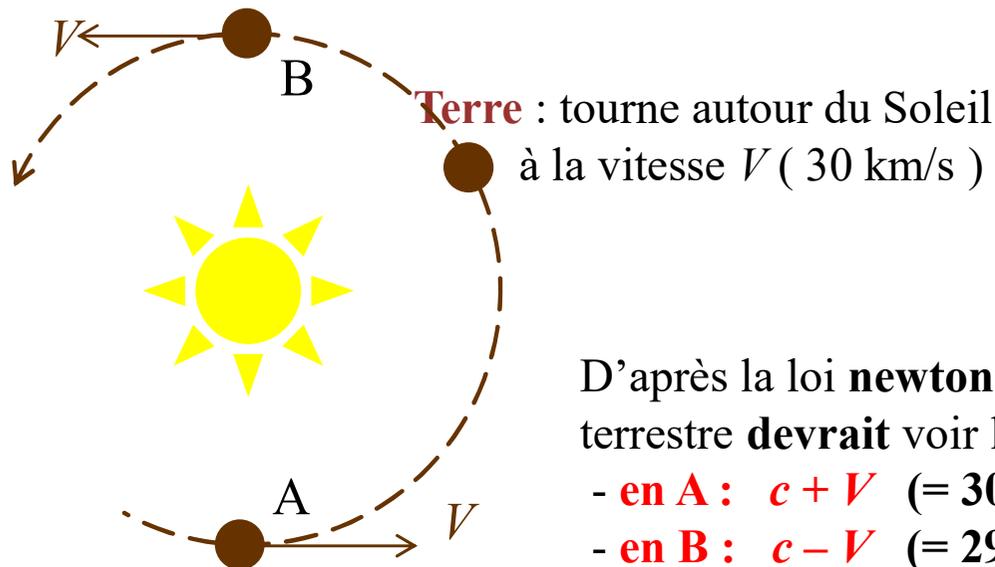
On l'a faite, cette expérience ...

Conclusion n'ayant rien à voir avec la nature des objets en mouvement, c'est-à-dire que :

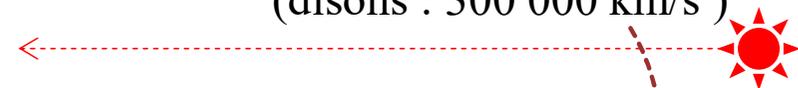
- si la lumière se déplace à une vitesse  $c$  (disons 300.000 km/s) par rapport au quai/Albert
- que le train se déplace à une vitesse  $v$  (disons 100 km/h) par rapport au quai/Albert
- alors la lumière se déplace à la vitesse  $c+v$  par rapport au train/Isaac si le train va « à la rencontre » de la lumière ( $c-v$  si la lumière « rattrape » le train)



On l'a faite, cette expérience ... en regardant la lumière venant d'une étoile, mais et en remplaçant le train par ... la Terre ! (Expérience de Michelson-Morley)



**Lumière** : de l'étoile vers le Soleil à la vitesse  $c$  (disons : 300 000 km/s)



D'après la loi **newtonienne** de composition des vitesses, un observateur terrestre **devrait** voir la lumière venant de l'étoile arriver à la vitesse :

- **en A** :  $c + V$  (= 300 030 km/s)
- **en B** :  $c - V$  (= 299 970 km/s)

ça veut dire quoi ...  
... **LA** vitesse de la lumière ?

Michelson & Morley (1881, 1887)

Expériences ??? →

La vitesse de la **lumière** :

- ne dépend pas du mvt de la source/l'observateur
- ne dépend pas de la direction



→ résultat **incompatible** avec le cadre conceptuel de l'espace-temps de Newton !!!

Moralité : **l'E-T de Newton n'est pas adapté** pour décrire tout ce qu'on observe dans notre univers !

En fait, les « **conclusions Newtoniennes** » fonctionnent :

- tant que **toutes** les vitesses considérées  $\ll c$  ... 
- ... **mais pas** dès que certaines vitesses sont **comparables à  $c$**  

→ repenser les notions d'espace & de temps, pour **proposer un espace-temps** (*nouveau* cadre axiomatique !) dont les propriétés :

- sont « voisines » de celles de l'esp-tps de Newton si TOUTES les vitesses considérées sont  $\ll c$  ...
- ... tout en rendant compte des propriétés révélées par l'expérience de Michelson & Morley

... et il faut notamment que la « composition des vitesses » dans ce nouvel E-T soit compatible avec ces 2 points, donc diffère de la loi de composition newtonienne «  $w=u+v$  » ...

... → il faut donc renoncer au caractère absolu du temps (dont «  $u+v$  » découle ...)

## L'espace-temps de Minkowski (cadre de la Relativité Restreinte)

L'E-T de Minkowski (1908) répond à toutes ces exigences (et il en est la solution la + simple !) :

- pour tout observateur (au « repos »), les propriétés du temps et de l'espace sont identiques à celles de l'E-T de Newton : temps uniforme, espace Euclidien → absence de « courbure »
- **MAIS** : l'intervalle de temps entre 2 évts donnés n'est pas le même pour 2 observateurs en mouvement relatif : **relativité du temps** → **temps non absolu**

... avec les conséquences :

- principe d'inertie ok (comme dans l'E-T de Newton)
- la **composition des vitesses** (a) redonne (asymptotiquement ...) celle de Newton si toutes les vitesses sont « faibles », mais (b) est **compatible avec l'exp M&M**

$$v_{voiture}^{(A)} = \frac{v_{train}^{(A)} + v_{voiture}^{(I)}}{1 + \frac{v_{train}^{(A)}}{c} \times \frac{v_{voiture}^{(I)}}{c}} \rightarrow \begin{cases} \approx v_{train}^{(A)} + v_{voiture}^{(I)} & \text{si } v_{train}^{(A)} \text{ \& } v_{voiture}^{(I)} \ll c \\ = c & \text{si } v_{train}^{(A)} \text{ ou } v_{voiture}^{(I)} = c \end{cases}$$



$$v_{train}^{(A)} = 40 \text{ km/h} \rightarrow v_{voiture}^{(A)} = 49.999\,999\,8 \text{ km/h} \neq \text{mais} \cong 50 \text{ km/h}$$

$$v_{train}^{(A)} = 300 \text{ km/h} \rightarrow v_{voiture}^{(A)} = 309.999\,990 \text{ km/h} \neq \text{mais} \cong 310 \text{ km/h}$$

$c$  = une nouvelle « constante de la physique »

- nécessaire pour définir de l'esp-tps de Minkowski
- pas de rapport a priori avec la lumière ...
- ... mais que l'exp M-M suggère fortement d'identifier à la vitesse de la lumière !

## → Qu'est-ce qui est « relatif », dans ce cadre ?

- **relativité du temps**, différence essentielle avec l'axiomatique de Newton !!!
- la **cinématique** (vitesses) **n'est plus complètement relativiste**, puisque (le module de) la vitesse d'un corps se « déplaçant à la vitesse de la lumière » est indépendant de l'observateur qui mesure cette vitesse

→ il y a, **cinématiquement** parlant, « **moins de relativité** » dans l' (les) esp-tps relativiste(s) que dans l'esp-tps de Newton !!!

En bref ...

Esp-tps de **Newton** :

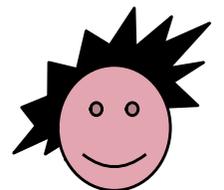
- l'**espace** est Euclidien (pas de « courbure »)
- l'**esp-tps** lui-même **n'a pas** de géométrie (dire que l'esp-tps de Newton est plat n'a pas de sens)

Esp-tps de **Minkowski** :

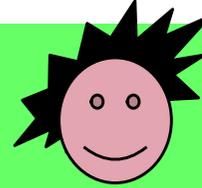
- (sans entrer dans les détails ...) c'est **l'esp-tps lui-même** qui **a une géométrie !**
  - ceci est **LA** (mon point de vue ...) grande leçon de l'expérience M-M !!!
- cette géométrie est « pseudo-Euclidienne » (pas de courbure)

**Découverte que la géométrie concerne l'espace-temps :**

→ **LA** (?) **plus grande découverte** de la physique théorique !



## Remarquons que ...



... dans l'esp-tps de M., il est **légitime** de parler de LA vitesse de la lumière ...  
... précisément grâce à la « perte de relativité cinématique » !!!  
Et ceci a une **application immédiate** dans notre **vie quotidienne** (actuelle)



Applications  
très concrètes !!!

GPS (Global Positioning System)

LA vitesse de  
la lumière ...

$$\text{Dist ém-réc} = c \cdot (t_2 - t_1)$$

La simple idée de la **technologie GPS** aurait été inconcevable  
avec les conceptions Newtoniennes de l'espace-temps !!!

... car il y a « trop de relativité » (cinématique) dans ce cadre !

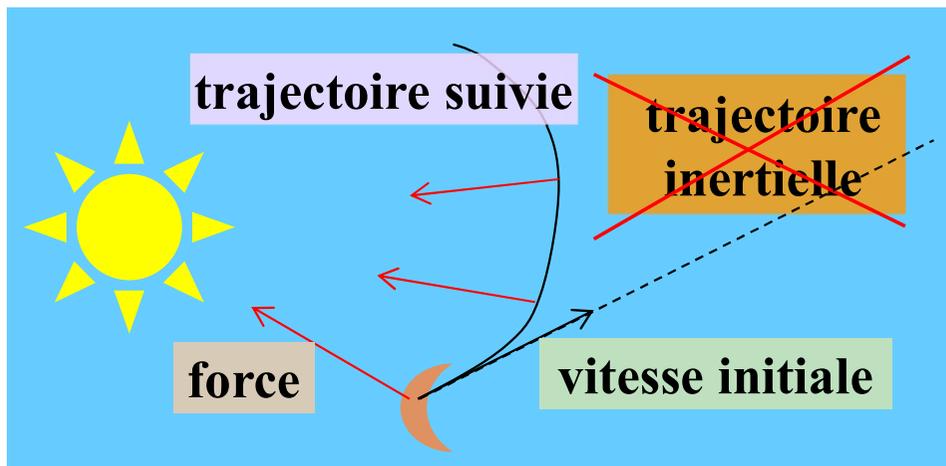
# 2 – La gravitation : de Newton à la Relativité Générale

## La gravitation selon Newton

Dans l'espace-temps de Newton :

mvt « naturel » (inertiel = en l'absence de force) = rectiligne uniforme

- espace Euclidien (→ homogène & isotrope)
- uniformité du temps



une **force** (la loi en  $1/(distance)^2$  ...) est **nécessaire** pour « expliquer pourquoi » le mvt d'une planète est *infléchi vers* le Soleil ...  
... le mvt de la Lune *infléchi vers* (tourne autour de) la Terre ...  
... la chute des corps (vers le sol) ...

Théorie de la **gravitation universelle** (Newton)

Pb1 - La théorie de Newton n'explique pas « naturellement » pourquoi **tous** les corps « tombent de la même façon » quand ils se trouvent au « même endroit » (fait observé)

Pb2 - Dans la théorie de Newton, la gravitation est un **phénomène instantané**

Si le Soleil disparaissait soudainement, alors :

- la Terre cesserait instantanément de tourner autour de lui ...
- ... alors qu'il serait encore visible (pendant 8 minutes !!!)

Propriété théorique  
(pas de support  
expérimental)

Rien de tel n'est  
connu en physique !!!

Newton : c'est un **défaut sérieux** de sa théorie !

« Je ne m'explique pas les causes de ce fait ... Mais tout colle avec cette loi ! »



... mais compatible avec le cadre spatio-temporel newtonien (temps absolu !)

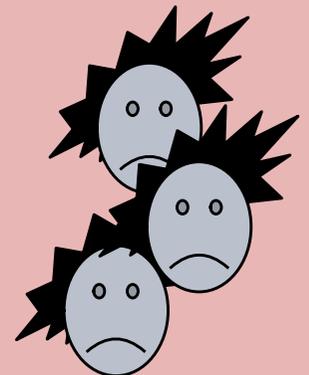
Pb3 - Anomalie du mouvement de Mercure (remarqué au XIX siècle)

$\delta\theta = 43''$  d'arc/siècle

Ça, c'est **vraiment grave !!!** ← **pb observationnel !**

Effet d'un corps (Vulcain) non répertorié ? **Jamais trouvé ...**

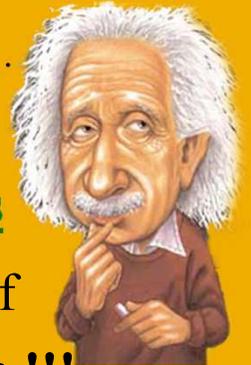
→ la théorie ne rend pas compte de ce **fait d'observation**



# La gravitation selon Einstein (théorie de la Relativité Générale)

Rappel (Pb1/Newton) : ... un **fait expérimental** : l'**universalité de la chute libre**

**Einstein** : l'universalité constatée de la chute libre nous apprend que le **mouvement d'un corps** soumis à la (seule) gravitation **ne dépend pas (des propriétés)** de ce corps  
→ il ne peut donc dépendre que des propriétés de **ce dans quoi il se meut** ...  
→ ... c'est-à-dire **des propriétés de l'espace-temps** (→ mvt libre/inertiel)  
→ **la gravitation est donc une conséquence des propriétés de l'espace-temps**



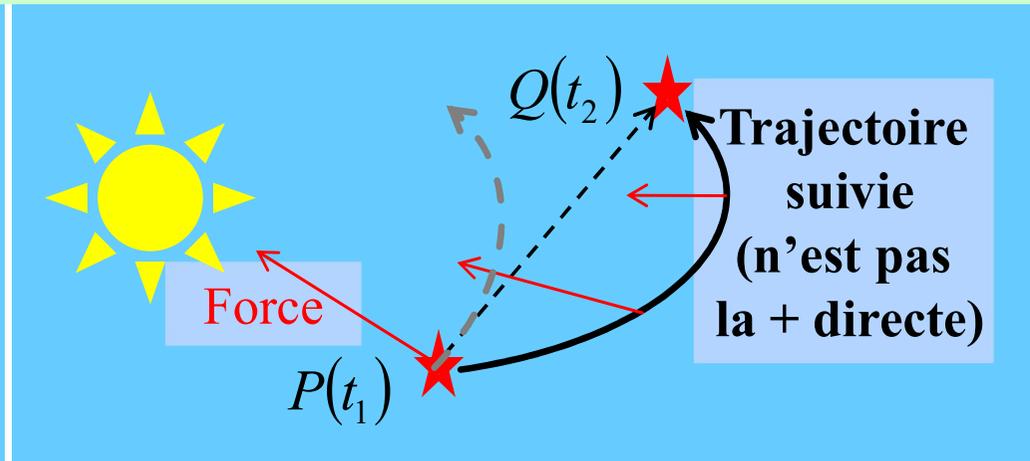
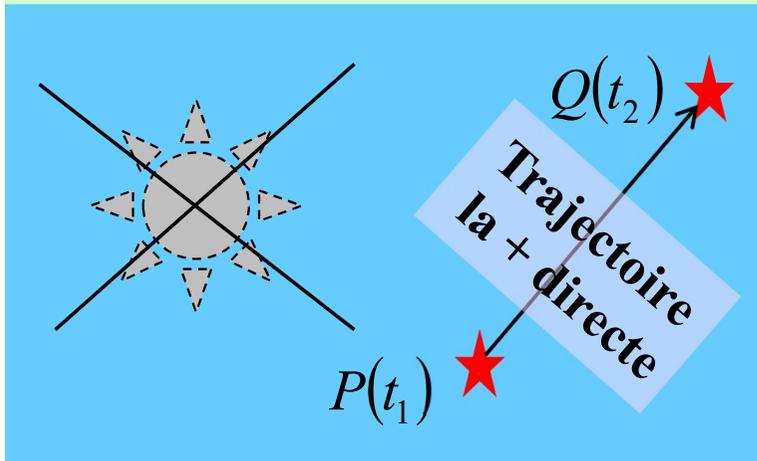
- Espace sans courbure + temps uniforme (esp-tps Newton) → mvt libre = rect unif
- **Space-temps sans courbure** (relativité restreinte / Einstein, Minkowski) → **idem !!!**
- **Einstein / relativité générale** : étant donné que la **gravitation** → mvts non rect unif ...  
... et qu'**on renonce à toute notion de force gravitationnelle**, alors, **nécessairement** :

**le phénomène de gravitation nous apprend que l'espace-temps :**

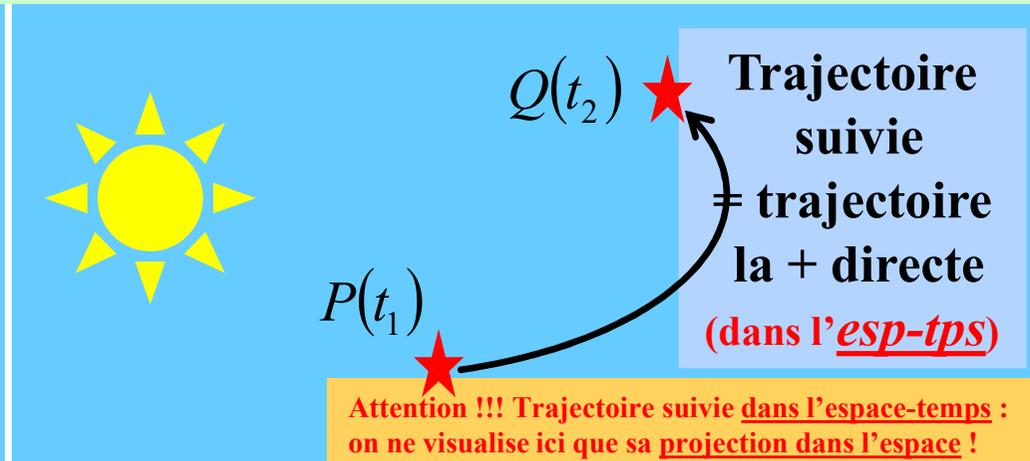
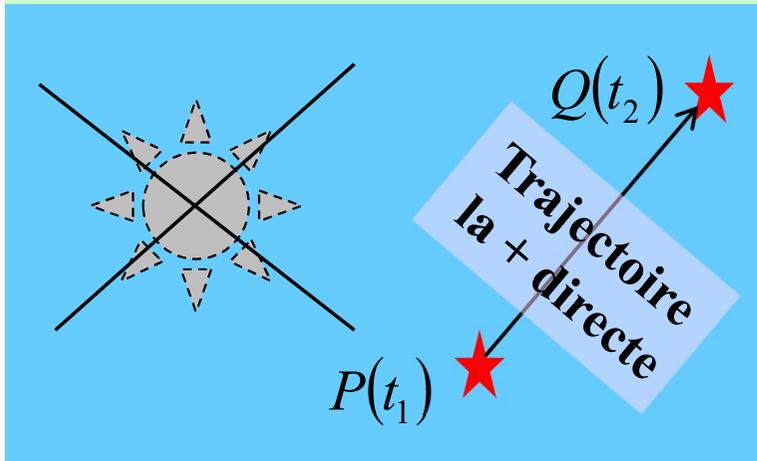
- (1) **n'a pas les propriétés de l'espace-temps de Minkowski (sans courbure) ...**
- (2) **... et donc possède une certaine « courbure »**
- (3) **la gravitation est un effet de cette « courbure » de l'espace-temps.**

## Résumé : relativité générale versus gravitation newtonienne :

**Newton : propriétés de l'espace-temps indépendantes du contenu matériel**



**Einstein : géométrie de l'espace-temps dépend du contenu matériel**



(quasi-)équivalence (sous certaines conditions) :  
importance de la notion d'espace-temps !!!

**Nombreux succès de la RG** : OK mvt de Mercure / lumière : « déviation » par le Soleil, lentilles gravitationnelles, ... / cosmologie / astres denses : étoiles à neutrons, trous noirs, ... / ondes gravitationnelles (la gravitation se propage !) / navigation spatiale / techno GPS / ...

# 3 – De bien étranges solutions : les trous noirs

Novembre 1915 : découverte de l'**équation d'Einstein** (équation de la RG) par

- Albert **Einstein** : le 25 (une version partielle, « dans le vide », le 18)
- David **Hilbert** : le 20

→ l'équation d'Einstein relie la géométrie de l'esp-tps à son contenu matériel

Décembre 1915 : découverte de la 1<sup>ère</sup> solution non triviale (dans le vide) par **Schwarzschild**

→ champ gravitationnel extérieur d'une étoile sphérique

→ **trou noir (TN) sphérique** (sans rotation)

Septembre 1939 : Oppenheimer & Snyder montrent que **les TNs sont des objets astrophysiquement réalistes !**

*Plus de 20 ans  
pour réaliser cela !!!*

Juillet/septembre 1963 : solution de **Kerr**

→ **TN stationnaire en rotation**

(Vus de l'extérieur), les TNs sont des **objets très simples** (quand ils sont « stationnaires », et quand ils ne le sont pas, ils le deviennent rapidement ...) en ce sens qu'ils ne sont **caractérisés que par 2 (3) nombres** :

- leur **masse  $m$**
- leur **moment angulaire**/unité de masse  **$a$**  (caractérise leur « rotation »)
- ( - en principe : leur charge électrique, qui est très probablement nulle pour les « trous noirs astrophysiques »)

Cas d'une planète :

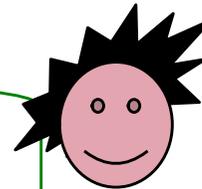
- masse
- moment angulaire
- aplatissement
- inhomogénéités & reliefs (développement du potentiel)

En bref : la solution de Kerr ( $m,a$ ) décrit (très probablement) le trou noir astro le + général !  
Schwarzschild = Kerr sans rotation = ( $m,a=0$ )

## Brève description des TNs de Schwarzschild

La solution de Schw décrit :

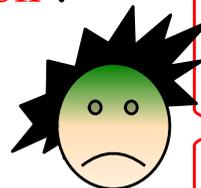
- le champ de gravitation autour d'un corps sphérique de masse  $m$
- permet de retrouver la loi de Newton (« force » en  $1/r^2$ ) quand on est à « suffisamment grande distance » ...
- ... **tout en expliquant l'anomalie du mvt de Mercure !**



Ça, ça a été très vite compris !

- les **propriétés des trous noirs sans rotation** :

- absence de matière ...
- ... mais présence d'une singularité
- existence d'un **horizon**
- existence **d'orbites limites**



Ça, ça a été **beaucoup plus long à comprendre !** Et il y a eu beaucoup de « résistance », tant cette solution **semblait physiquement irréaliste !!!**

Singularité : indique qu'on entre, quand on s'en approche, dans une région dans laquelle la théorie qui lui a donné naissance cesse d'être valable  
→ à remplacer par « autre chose » : très probablement une théorie quantique de la gravitation (c-à-d : théorie quantique de l'espace-temps)

Rayon d'un TN de Schw. :  $r_g = \frac{2Gm}{c^2} = r_{Schw}$

(ou horizon des événements)

3 km pour un TN d'1 masse solaire  
 30 km pour un TN de 10 masses solaires  
 ...  
 Simplement proportionnel à la masse!

Horizon des événements du TN

Vitesse orbitale *locale* sur cette orbite limite =  $c/2$

Vitesse orbitale *locale* sur cette orbite limite =  $c$

Existence d'orbites circulaires  
 (orbite jaune = LCO = Last Circular Orbit)

Existence d'orbites circulaires *stables*  
 → rayon interne d'un (éventuel) disque de gaz  
 (orbite rouge = LSCO = Last Stable Circular Orbit = dernière orbite circulaire stable)

$r = 3r_g$

Comprendre : sphères de « circonférences »

$$2\pi \times r_g, \quad 2\pi \times \frac{3}{2}r_g, \quad \underline{2\pi \times 3r_g}$$

~ 55 km pour le Soleil

Précisions/significations concernant ce qu'« est » un TN ... :

- la **singularité du TN** (qui n'est pas le « centre du TN », voir ci-dessous) **n'est pas un lieu**, mais une **date** (un ensemble de dates), à laquelle la structure (géométrie) de l'esp-tps devient « **singulière** » (et échappe à toute description en termes de RG)
- à l'**intérieur de l'horizon** du TN, l'esp-tps est « **dynamique** » (de même que notre Univers est dynamique puisqu'en expansion, mais cette dynamique est plus complexe dans le cas TN). **C'est cette dynamique qui conduit cette région de l'esp-tps à un état singulier** dans le futur de tout obs pénétrant dans cette région.

Précisions/significations concernant ce qu'« est » un TN ... :

- la **singularité du TN** (qui n'est pas le « centre du TN », voir ci-dessous) **n'est pas un lieu**, mais une **date** (un ensemble de dates), à laquelle la structure (géométrie) de l'esp-tps devient « **singulière** » (et échappe à toute description en termes de RG)
- à l'**intérieur de l'horizon** du TN, l'**esp-tps** est « **dynamique** » (de même que notre Univers est dynamique puisqu'en expansion, mais cette dynamique est plus complexe dans le cas TN). **C'est cette dynamique qui conduit cette région de l'esp-tps à un état singulier** dans le futur de tout obs pénétrant dans cette région.

... et ce qu'on entend/lit parfois concernant les TNs ...

- quand on parle du « centre » du TN ...
  
- le champ grav à l'intérieur d'un TN est si intense qu'une fois l'horizon franchi, on est inévitablement « précipité vers le centre du TN » (impossibilité de « revenir en arrière »)

Précisions/significations concernant ce qu'« est » un TN ... :

- la **singularité du TN** (qui n'est pas le « centre du TN », voir ci-dessous) **n'est pas un lieu**, mais une **date** (un ensemble de dates), à laquelle la structure (géométrie) de l'esp-tps devient « **singulière** » (et échappe à toute description en termes de RG)
- à l'**intérieur de l'horizon** du TN, l'esp-tps est « **dynamique** » (de même que notre Univers est dynamique puisqu'en expansion, mais cette dynamique est plus complexe dans le cas TN). **C'est cette dynamique qui conduit cette région de l'esp-tps à un état singulier dans le futur de tout obs pénétrant dans cette région.**

... et ce qu'on entend/lit parfois concernant les TNs **versus** **ce qu'il faudrait entendre/lire** :

- quand on parle du « centre » du TN ...
  - ... comme évoqué ci-dessus, l'utilisation (abondante, y compris chez les astronomes !!!) du terme « centre » est une erreur sémantique grave, en ce sens qu'elle induit beaucoup de confusion. La « singularité  $r = 0$  » est une date, **pas un « lieu »**
- le champ grav à l'intérieur d'un TN est si intense qu'une fois l'horizon franchi, on est inévitablement « précipité vers le centre du TN » (impossibilité de « revenir en arrière »)
  - quand on traverse l'horizon d'un TN, il ne se passe (localement) **rien de spécial**
  - ... et c'est également **vrai partout à l'intérieur du TN** (sauf au niveau de la singularité)
  - **on peut toujours se déplacer dans toutes les directions** : en avant/arrière, à gauche/droite, en haut/bas ...
  - mais on est dans une région de l'esp-tps dans laquelle la **dynamique de l'esp-tps est si « rapide »** qu'il est **impossible de rejoindre/retraverser l'horizon avant d'atteindre la singularité**

Autre source de confusion : TNs versus **« astres occlus » de Michell-Laplace** (1783/1796).

L'idée (contexte spatio-temporel ... *Newtonien* !!!) :

- tout corps massif définit une « vitesse de libération »  $v_{lib}$
- si  $v_{lib} >$  **vitesse de la lumière**, celle-ci est gravitationnellement piégée et ce corps est **invisible**

Cette argumentation semble crédible, **mais** (contexte *Newtonien* toujours ...)

- **c'est quoi, LA vitesse de la lumière ?** (idem contexte)
- la lumière ne définit **aucune limite de vitesse** (idem contexte)
- il est **possible d'extraire de la matière, de la lumière, de l'information** ... (éventuellement en plusieurs étapes) de ces « astres occlus »
- ...

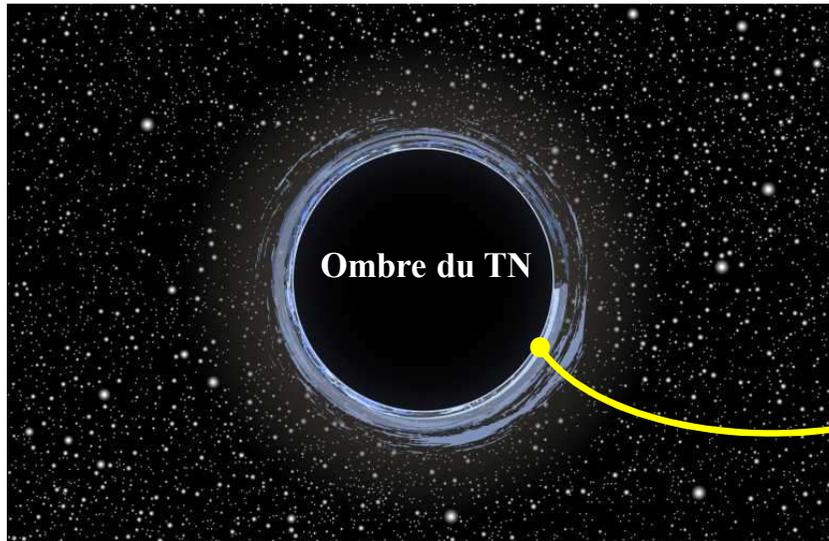
**Point important (RG !) : une structure TN est une propriété de l'esp-tps (relativiste !)**

En bref, sur les TNs de Kerr :

- plus complexes que les TNs de Schw ...
- ... mais **ce qui est dit ci-dessus reste vrai dans les grandes lignes** (interprétation non triviale de « la » singularité, caractère dynamique de l'esp-tps « derrière » l'horizon, existence d'orbites limites, ...)
- structure globale de l'esp-tps de la métrique de Kerr, comme *solution de la RG dans le vide*, présente (en plus) des « bizarreries » plus que troublantes (boucles temporelles, régions de gravité négative, Univers multi-nappes, ...) ...
- ... mais il est **très possible (probable ?) que ces bizarreries ne concernent pas les TN « formés astrophysiquement »** (par effondrement stellaire, voir + loin)

# Que « voit-on » quand on regarde un (en direction d'un) TN ?

Image chipée sur le net, montrant un fond d'étoiles en arrière-plan d'un TN



Attention :  
ceci  
**N'EST PAS**  
l'horizon du  
trou noir !

Question : comment se propage la lumière quand elle passe près d'un TN (sans rotation) ?

Rappel : orbites  
circulaires limites  
dans l'esp-tps de  
Schw



Trajectoire de photons (lumière) dans un champ gravitationnel sphérique :



Le **cas limite** avant la traversée de la sphère photonique ?  
→ l'orbite du photon **s'enroule indéfiniment autour de la sphère photonique** (mais sans jamais l'atteindre)

Taille "apparente" d'un TN :

$$r_{sh} = \frac{3\sqrt{3}Gm}{c^2} = \left(\frac{2Gm}{c^2}\right) \times \left(\frac{3}{2}\right) \times \left(\sqrt{3}\right) \approx 2.60 \times r_{Schw}$$

« Taille »  
du TN

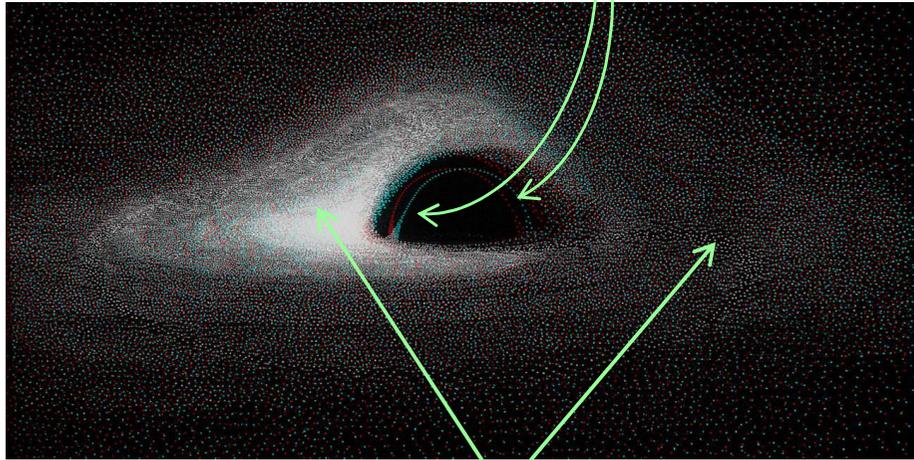
C'est la sphère  
photonique qui  
compte !

Le photon ne se  
déplace pas « en  
ligne droite »

## Quelle est l'image d'un disque de gaz en rotation autour d'un TN ? (disque d'accrétion)

Simulations d'images (Jean-Pierre Luminet, ...)

Images multiples accumulées  
« sur » la sphère photonique



Effet Doppler → dissymétrie dans l'image

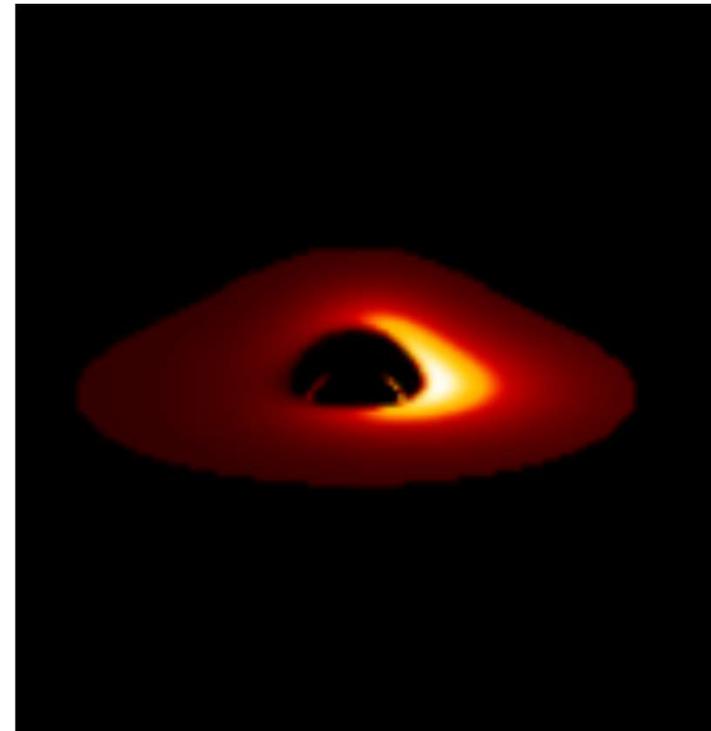


Image du film « interstellar » ...

- construite à partir de (véritables !) calculs relativistes ...
- ... sauf qu'a été « retiré » l'effet Doppler (pour que ce soit plus « spectaculaire » ... d'après eux !)
- les calculs faits pour ce film ... ont donné lieu à une **publication dans Class. Quant. Grav. !!!**

# 4 – Et l'astrophysique dans tout ça ?

Novembre 1915 : mise au point de la RG (Albert Einstein, David Hilbert)

Décembre 1915 : découverte de la **solution de Schwarzschild**

Septembre 1939 : Oppenheimer & Snyder montrent que les TNs sont des **objets « réalistes »**, représentant l'**état final d'étoiles suffisamment massives**

Septembre 1963 : **solution de Kerr** (trous noirs en rotation)

*La théorie ...*

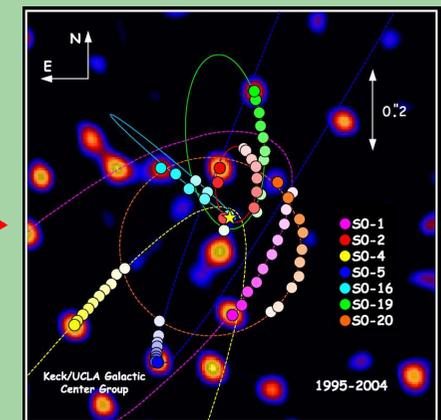
## *... et les observations*

**60's : quasars** : - très lointains (distances cosmologiques)  
- très énergétiques  
- très compacts (variation rapide de leurs propriétés)

Source d'énergie plausible (la seule semblant satisfaisante) : un disque de matière en orbite autour d'un trou noir hypermassif

**90's** : mise en évidence d'un **TN de 4 millions de masses solaires** au cœur de notre Galaxie, **par observation directe d'orbites d'étoiles** dans son voisinage

**Novembre 2015** : 1<sup>ère</sup> observation de la **fusion de 2 TNs stellaires** par le **rayonnement gravitationnel** induit (des dizaines d'autres cas observés depuis)  
(On a aussi observé des fusions TN-étoile à neutrons)



**Avril 2019** : l'image du centre de **M87** révèle la **présence d'un TN de 6 milliards de masses solaires**

**Mai 2022** : (~) idem pour le TN de notre Galaxie

**Observations EHT** : révèlent le TN par l'ombre portée sur la matière environnante (ou, plus précisément, la frontière interne du disque d'accrétion du TN)

# Observer l'ombre d'un TN

Un « temps caractéristique » :  
le temps  $T$  pour faire le tour  
d'un TN sur la LSCO (calcul  
pour un TN de Schwarzschild)

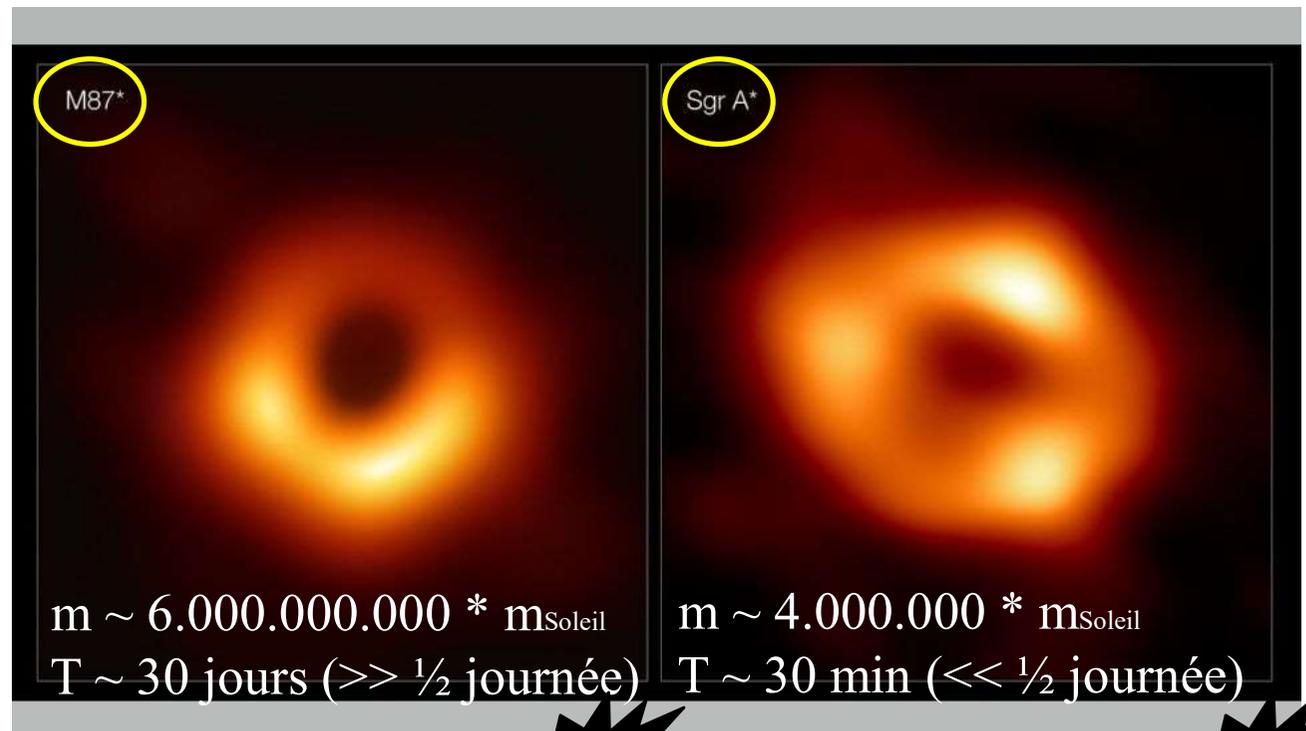
$$\left(\frac{c}{2}\right) \times T = \left(\frac{3Gm}{c^2}\right) \times (2\pi) \times \left(\sqrt{\frac{3}{2}}\right) \rightarrow T = (0.000367 \text{ s}) \times \frac{m}{m_{\text{Soleil}}}$$

Vitesse orbitale sur LSCO    Période observée (ce qu'on veut !)

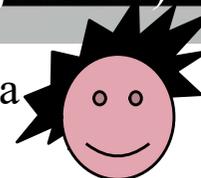
Rayon de la LSCO    Circonférence =  $2\pi * \text{rayon}$

Effet Einstein (effet de relativité du temps induit par la gravitation)

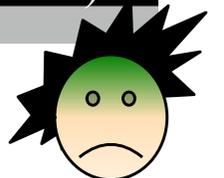
Temps d'acquisition de ces images (techniques impliquant l'accumulation d'images obtenues par plusieurs radio-télescopes sur Terre) : **1/2 journée**



(Quasi-) instantané de la situation physique (image « véritable »)



N'est pas un instantané de la situation physique (image dépendant d'un modèle)



# L'origine des TNs ?

**TNs d'origine stellaire** : par effondrement gravitationnel d'une **étoile suffisamment massive** arrivant en fin de vie nucléaire.

La **masse du résidu final n'est pas la masse initiale**, pour différentes raisons :

- quantité importante de masse perdue lors des différentes phases de la vie nucléaire de l'étoile (vent stellaire, éjection brutale pendant les phases transitoires entre différents cycles nucléaires, supernovae, ...)
- cas (nombreux !) des étoiles doubles : phénomènes de transfert de masse (effets sporadiques, novae, ...)

Si la masse « initiale » de l'étoile (cas d'une étoile isolée) est :

- **inférieure à 3 Msol** : résidu final = **naine blanche** (0.3 à 1 Msol, dimension ~ planète tell.)
  - équilibre (matière) assuré par le **principe de Pauli** limitant la densité électronique (effet quantique)
- **entre 3 et 15-20 Msol** : résidu final = **étoile à neutrons** (1.5 à 3 Msol, dimension ~ 10/20 km)
  - équilibre (matière) assuré par l'**entassement des neutrons**, peu compressibles
- **supérieure à ~ 20 Msol** : résidu final = **TN** (quelques Msol à beaucoup plus ...)
  - **juste du vide** ...
    - que devient la **matière** (derrière l'horizon, vers la singularité) ?  
**Physique inconnue** ...

## TNs primordiaux

Le **modèle cosmologique standard** décrit l'Univers comme ayant été très **homogène** :

- le cas vers **300.000 ans après le big-bang** (observations COBE, Planck), avec de très **faibles inhomogénéités** ...
- ... qui ensuite, **par effondrement gravitationnel**, ont donné naissance aux diverses structures peuplant l'Univers actuel (étoiles, galaxies, amas galactiques, ...)
- dans l'Univers actuel, l'**homogénéité** semble toutefois **préservée à de grandes échelles**

Malgré les nombreux succès de ce modèle, il est très **possible que l'Univers soit « né » avec de fortes inhomogénéités**, ayant conduit à la formation de **TNs primordiaux** (créés « avec » l'Univers ou juste après), qui ont pu fusionner et former des TNs plus massifs. Tout cela bien, bien, **bien avant l'âge de 300.000 ans** ....

Un **fait d'observation** (semblant de plus en plus indiscutable) : quasiment **toutes les galaxies massives abritent en leur centre un TN** très massif (millions de Msol), voire hypermassif (centaines de millions, ou milliards, de Msol).

→ Questions concernant ces TNs galactiques :

- ont-ils été **formés après la formation des galaxies** (fusion successive de TNs stellaires) ?
- **les galaxies se sont-elles formées « autour » de TNs primordiaux** (TNs primordiaux comme catalyseurs de formation galactique), qui « grossissent » ensuite par accrétion de matière, pour devenir ces TNs galactiques très/hyper massifs ?
- ... ?

Questions largement ouvertes ...

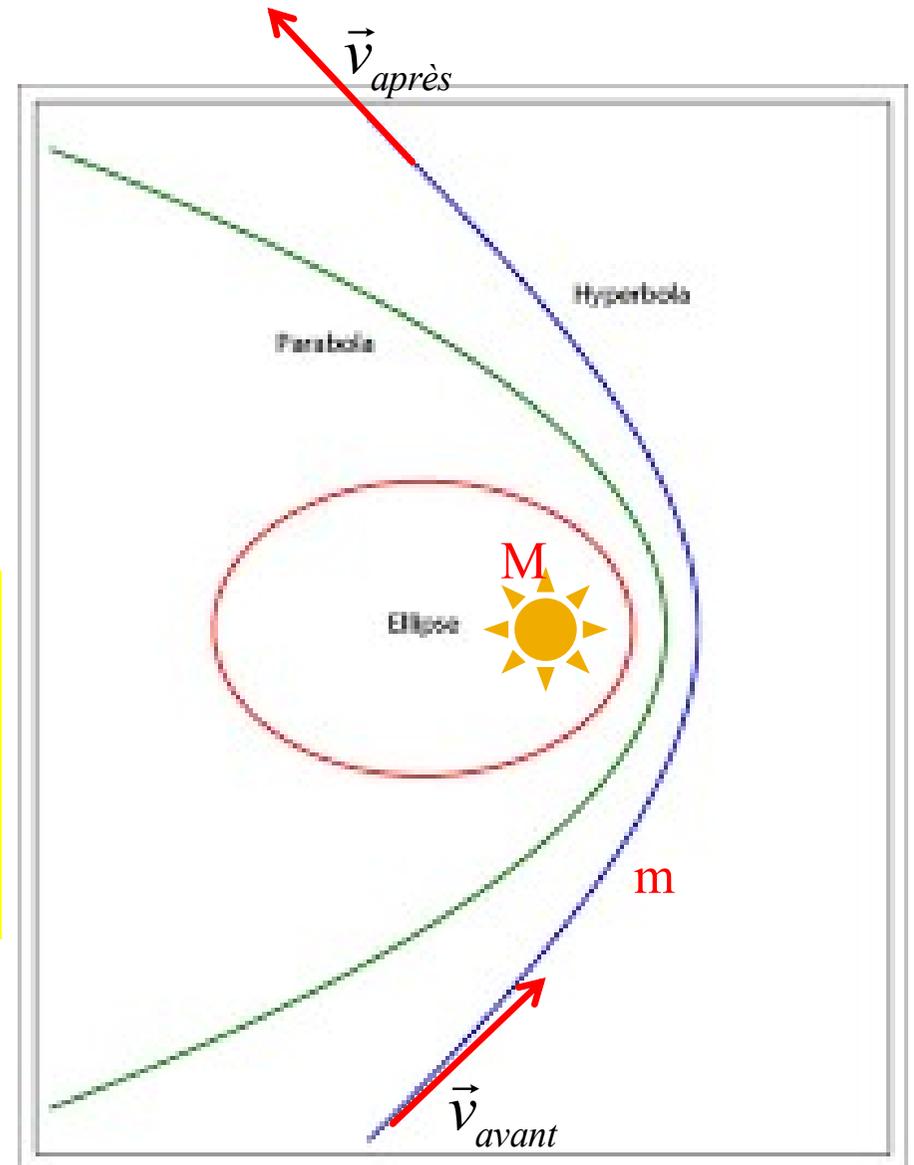
# Ejection d'étoiles : quel rôle les TNs galactiques peuvent-ils tenir dans l'évolution des galaxies qui les hébergent ?

## Petit rappel de mécanique céleste ...

Soit un corps massif  $M$ , et un corps de faible masse  $m$  venant de l'infini et survolant  $M$ . Le mouvement de  $m$  par rapport à  $M$  est hyperbolique (vient de l'infini et y retourne), et sa vitesse (bien) après le survol = sa vitesse (bien) avant le survol.

## OUI MAIS :

- c'est vrai pour le **module de la vitesse** (les km/s), de  $m$ , pas pour la direction de cette vitesse ...
- ... et de plus seulement **dans le référentiel dans lequel  $M$  est au repos**



## Ces deux points impliquent que si M est en mouvement, la propriété n'est plus vraie ...

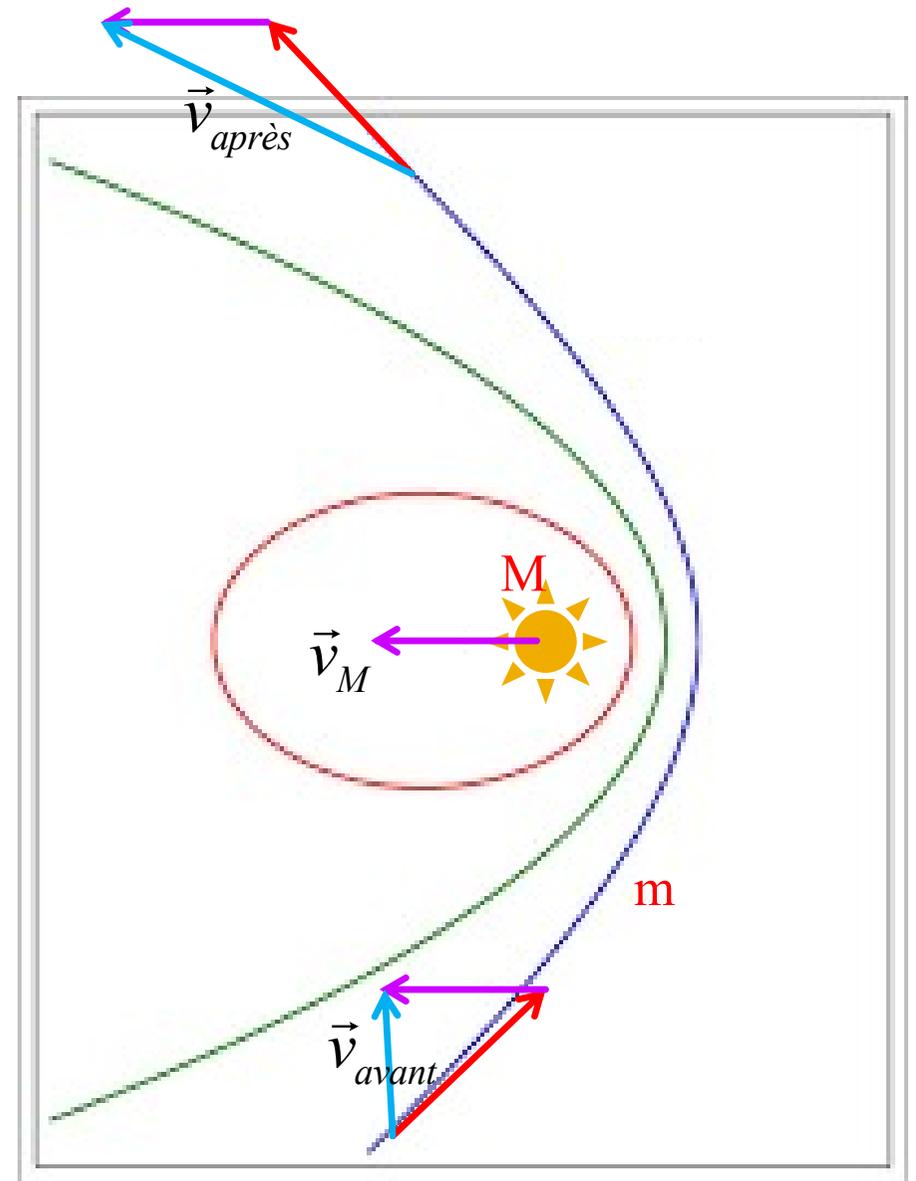
... car les vitesses « avant » et « après » s'obtiennent maintenant en **composant ces vitesses avec la vitesse** (d'entraînement) **de M.**

(Composition Newtonienne suffisante pour comprendre le phénomène, et pour les applications à venir)

Suivant la configuration, on peut avoir  $v_{\text{après}} < \text{ou} > v_{\text{avant}}$

### Une application ?

Le phénomène de « **fronde gravitationnelle** », utilisé en **astronautique** pour donner de l'énergie aux sondes planétaires par le biais de **survol planétaires** (économie d'énergie au départ !!!)



→ Autre chose ???

En 2020, un groupe de chercheur reporte **une étoile dans notre galaxie** :

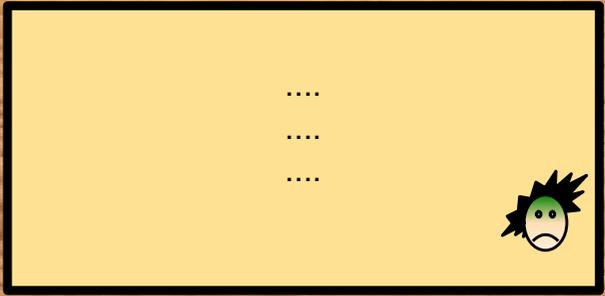
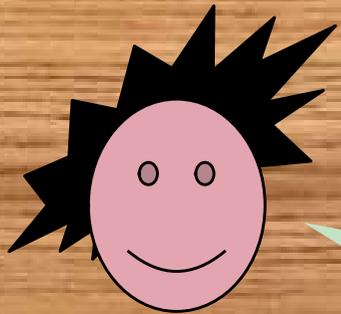
- se déplaçant à **1700 km/s** (vitesse orbitale du Soleil dans notre Galaxie :  $\sim 250$  km/s)
- de vitesse constante (n'est pas en train de tourner autour d'un objet massif non visible)
- **venant du centre galactique** (calcul de son orbite dans la Galaxie en « remontant le temps »)
- son **passé semble donc associé à la région Sgr A\***

D'autres étoiles anormalement rapides ( $v > v_{\text{éjection}}$ ) avaient déjà été observées, mais avec des vitesses  $\sim 2$  fois plus faibles

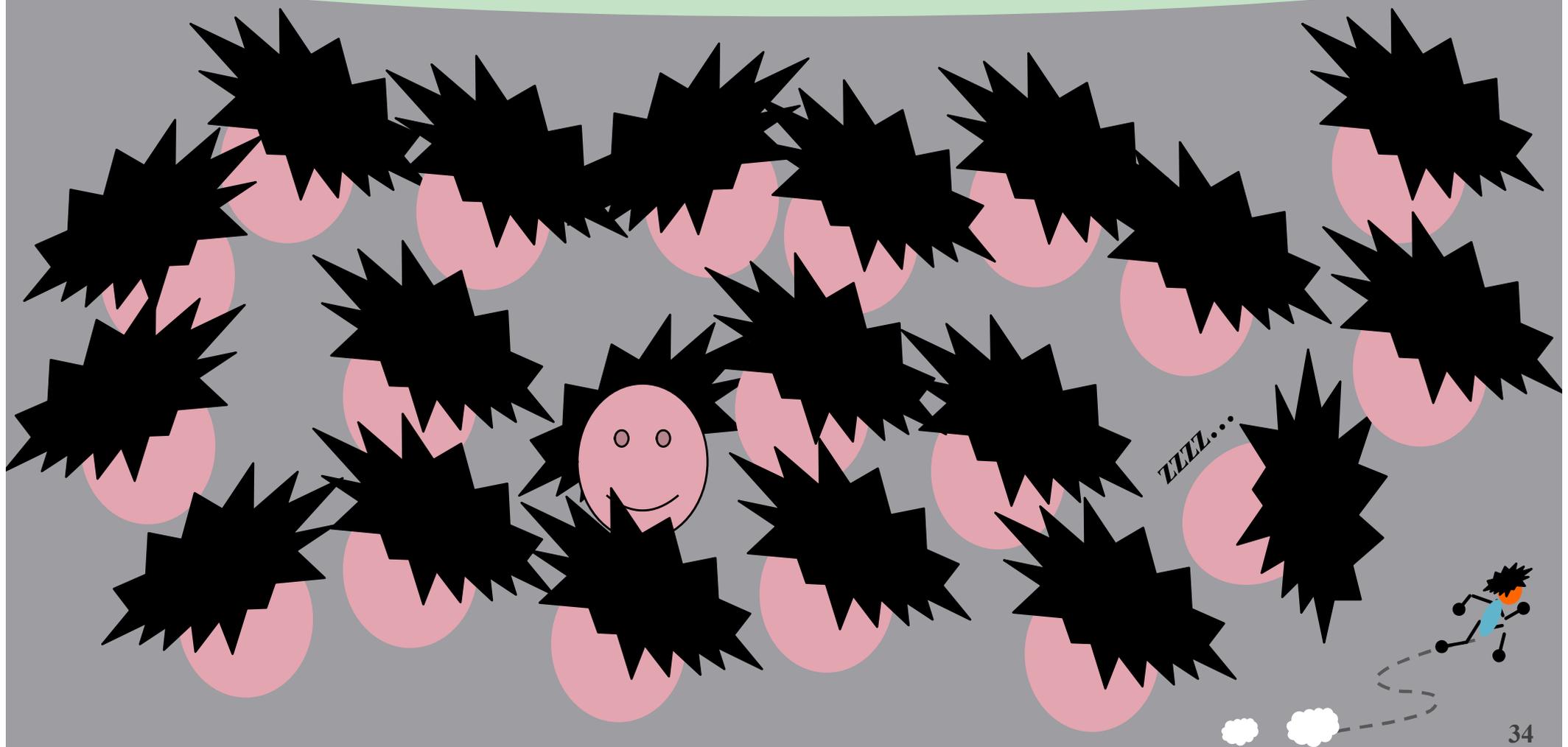
Statistique basée sur les observations du satellite **Gaia** : ce taux d'éjection pourrait être de l'ordre de **une étoile par 100 ou 1000 ans**

### **Mécanisme d'éjection ?**

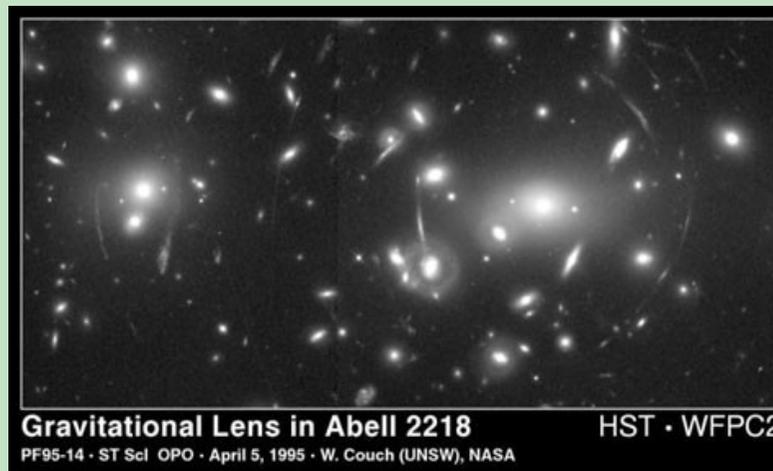
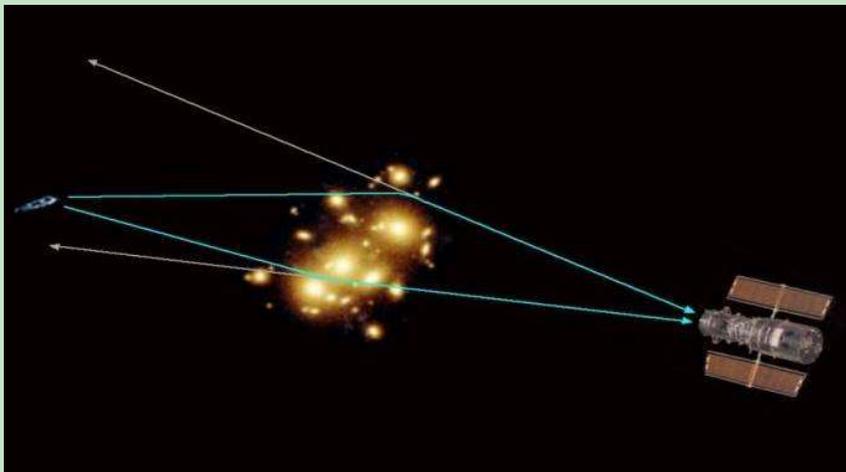
- Le mécanisme de **fronde gravitationnelle** ci-dessus peut expliquer ce genre de situation
- La communauté pense plutôt à un mécanisme de **disruption d'étoiles doubles entrant dans la « zone d'influence » du TN**
- Mais : **problème ouvert**, mécanisme d'éjection est encore débattu et n'est **peut-être pas unique**
- **Quoiqu'il en soit : rôle du TN en tant que catalyseur de vitesses** (mais ce n'est pas l'interaction d'une étoile *unique* avec le TN qui cause son « hyper-vélocité »)
- Taux d'éjection semble plutôt faible (dans notre Galaxie)
  - peu d'effet sur la population galactique ...
- ... mais effet augmente avec la masse du TN est grande (effet proportionnel à  $m^2$  ?)
- montre que **les TNs** peuvent avoir une **influence ne se limitant pas à leur voisinage immédiat** (ses effets peuvent concerner la galaxie hôte dans son ensemble)



... et merci pour votre attention !!!

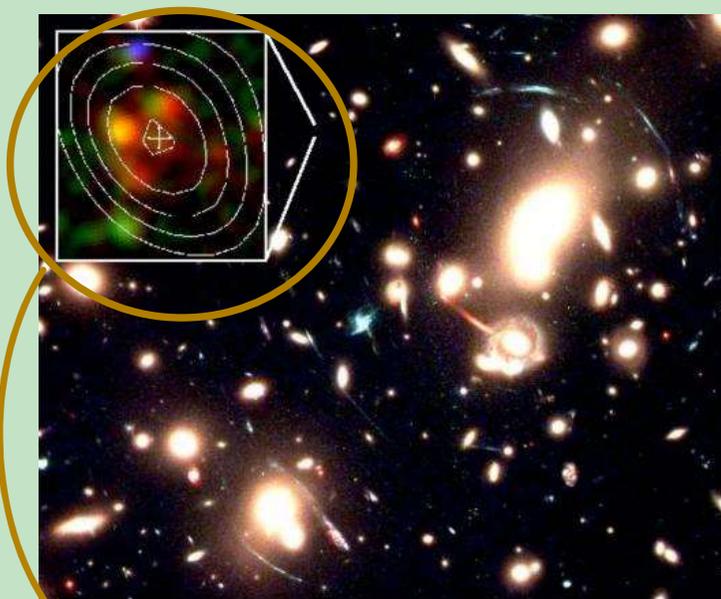
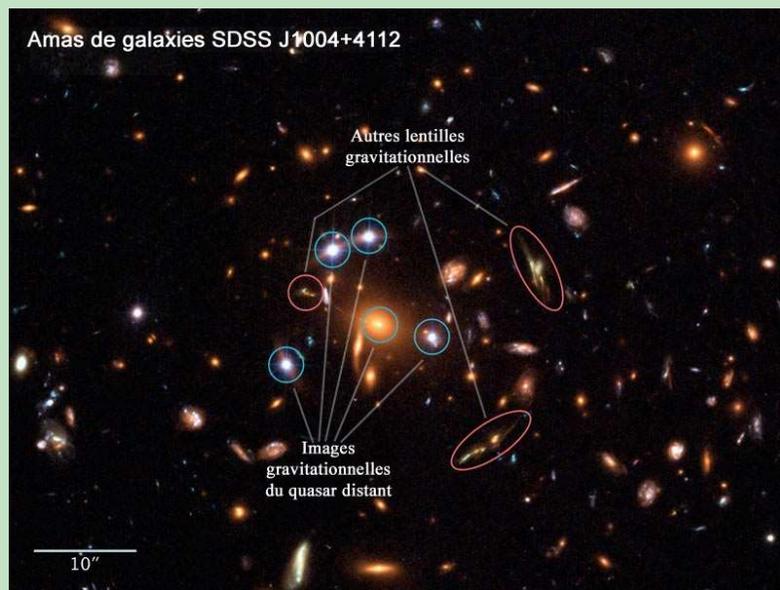


## Autre aspect : le « lentillage gravitationnel » (par des objets astro, pas forcément TN)



Images déformées  
et multipliées ...  
ça peut être un  
problème pour  
reconnaître  
certains objets ...

... mais ça peut aussi **apporter des informations précieuses** : répartition de **matière non visible**, timing sur les images d'un même objet (les parcours ne sont pas les mêmes → un événement au niveau de l'objet n'est pas vu au même moment sur les images) ...



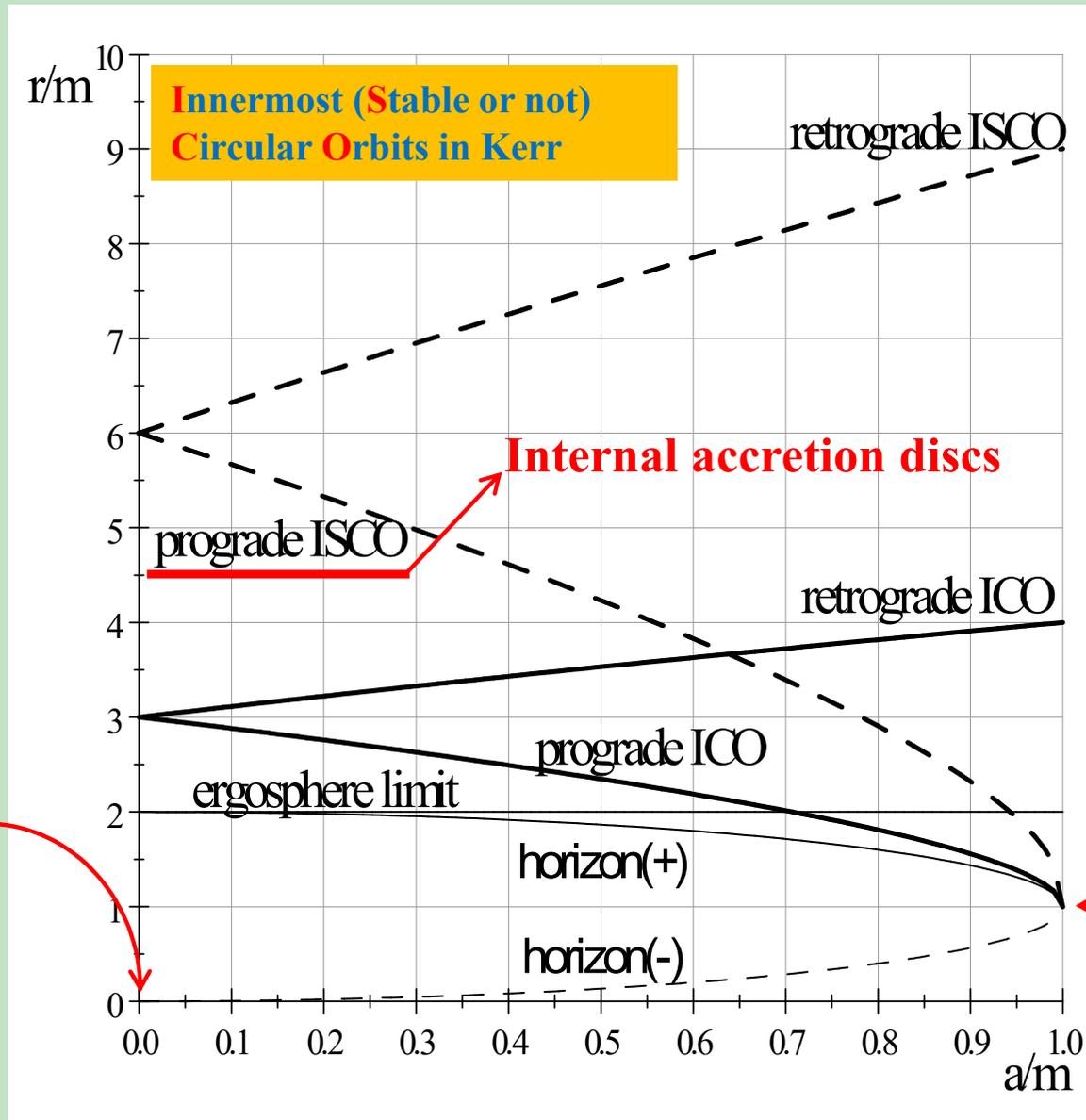
Le domaine est passé  
du statut de simple  
curiosité ... à celui  
d'**outil cosmologique  
très efficace !!!**

... et ça peut même parfois nous aider !  
**Amplification → télescopes « naturels »**

Attention !!! Facile ... en faisant l'hypothèse d'un TN sans rotation !!!

→ si rotation (Kerr) : LSCO peut être beaucoup plus faible, et période aussi !

Kerr : orbites limites (dans le plan equatorial)



## - une étoile éjectée de la VL à 1700 km/s (MNRAS (2020)) USA/UK/Australia

We present the serendipitous discovery of the fastest main-sequence hyper-velocity star (HVS) by the Southern Stellar Stream Spectroscopic Survey (S5). The star S5-HVS1 is a  $\sim 2.35 M_{\odot}$  A-type star located at a distance of  $\sim 9$  kpc from the Sun and has a heliocentric radial velocity of  $1017 \pm 2.7$  km s $^{-1}$  without any signature of velocity variability. The current 3D velocity of the star in the Galactic frame is  $1755 \pm 50$  km s $^{-1}$ . When integrated backwards in time, the orbit of the star points unambiguously to the Galactic Centre, implying that S5-HVS1 was kicked away from Sgr A\* with a velocity of  $\sim 1800$  km s $^{-1}$  and travelled for 4.8 Myr to its current location. This is so far the only HVS confidently associated with the Galactic Centre. S5-HVS1 is also the first hyper-velocity star to provide constraints on the geometry and kinematics of the Galaxy, such as the Solar motion  $V_{\odot} = 246.1 \pm 5.3$  km s $^{-1}$  or position  $R_0 = 8.12 \pm 0.23$  kpc. The ejection trajectory and transit time of S5-HVS1 coincide with the orbital plane and age of the annular disc of young stars at the Galactic Centre, and thus may be linked to its formation. With the S5-HVS1 ejection velocity being almost twice the velocity of other hyper-velocity stars previously associated with the Galactic Centre, we question whether they have been generated by the same mechanism or whether the ejection velocity distribution has been constant over time.

## ApJ (2020)

Recent observations have found a 1700 km s $^{-1}$  star [S5-HVS1] that was ejected from the Galactic center approximately five million years ago. This star was likely produced by the tidal disruption of a binary. In particular, the Galactic center contains a few million year old stellar disk that could excite binaries to nearly radial orbits via a secular gravitational instability. Such binaries would be disrupted by the central supermassive black hole, and would also explain the observed cluster of B stars  $\sim 0.01$  pc from the Galactic center. In this paper we predict S5-HVS1 is part of a larger stream, and use observationally motivated N-body simulations to predict its spatial and velocity distributions.

## MNRAS (2022)

A dynamical encounter between a stellar binary and Sgr A\* in the Galactic Centre (GC) can tidally separate the binary and eject one member with a velocity beyond the escape speed of the Milky Way. These hypervelocity stars (HVSs) can offer insight into the stellar populations in the GC environment. In a previous work, our simulations showed that the lack of main sequence HVS candidates with precise astrometric uncertainties and radial velocities in current data releases from the *Gaia* space mission places a robust upper limit on the ejection rate of HVSs from the GC of  $3 \times 10^{-2}$  yr $^{-1}$ . We improve this constraint in this work by additionally considering the absence of post-main sequence HVSs in *Gaia* Early Data Release 3 as well as the existence of the HVS candidate S5-HVS1. This evidence offers degenerate joint constraints on the HVS ejection rate and the stellar initial mass function (IMF) in the GC. For a top-heavy GC IMF as suggested by recent works, our modelling motivates an HVS ejection rate of  $\eta = 0.7 + 1.5 \cdot 10^{-4}$  yr $^{-1}$ . [[ $10^{-3}$  per yr]] This preferred ejection rate can be as large as  $10^{-2}$  yr $^{-1}$  for a very top-light IMF and as low as  $10^{-4}$  yr $^{-1}$  if the IMF is extremely top-heavy. Constraints will improve further with future *Gaia* data releases, regardless of how many HVS candidates are found therewithin.



C'ÉTAIT PROPRE, NET ET SANS BANURES.  
EH BIEN NON! IL A ENCORE FALLU QU'UNE  
SORTE DE DINQUE DISE UNE ÂNERIE :



SI C'EST PAS MALHEUREUX D'ENTENDRE ÇA!  
UN GRAND GARÇON DE CET ÂGE-LĀ! GALILÉE, QU'IL  
S'APPELLAIT. MAIS OUF!.. VOILĀ L'HOMME SENSÉ!

