

Trous noirs astrophysiques

Séminaire SAF, 10 décembre 2022

Benjamin Crinquand



Plan

- Origine du concept
- Astronomie des trous noirs de masse stellaire
- Astronomie des trous noirs supermassifs
- Perspectives modernes

N'hésitez pas à poser des questions !

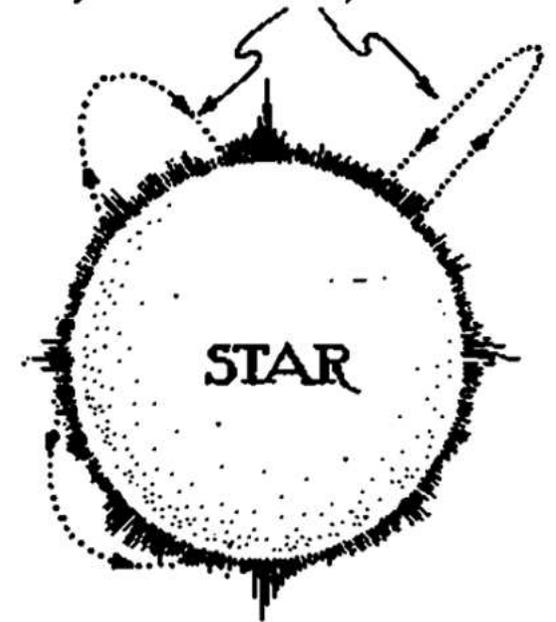
*Bibliographie : Trous noirs et distorsions
du temps : l'héritage sulfureux
d'Einstein, K. Thorne, 1997, Flammarion*

Origine du concept - Les « étoiles sombres »

- Idée de Laplace, le « Newton français », et John Mitchell
- Théorie corpusculaire de la lumière
- Si l'étoile est suffisamment compacte, la vitesse de libération dépasse la vitesse de la lumière
- La lumière ne pourrait s'échapper, l'étoile apparaîtrait « sombre »



Trajectories of light corpuscles



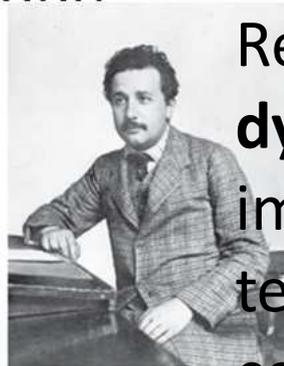
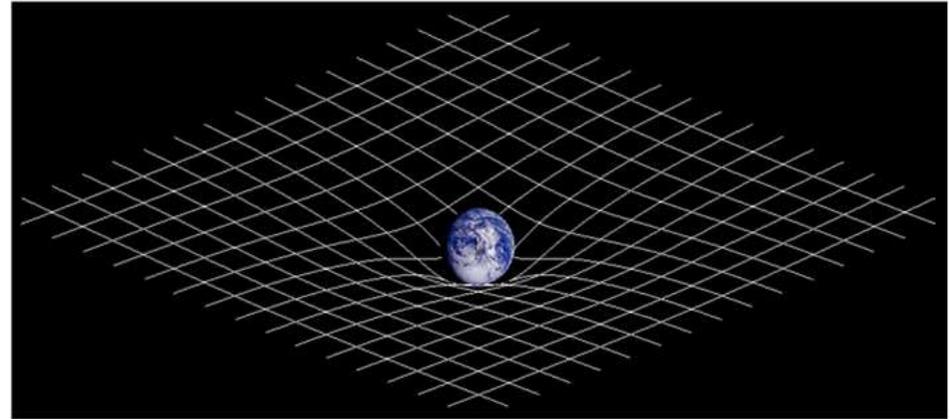
Origine du concept – Relativité générale

Idées-force de la relativité restreinte

- Relativité restreinte : temps et espace sont intriqués et relatifs
- Causalité : ni information ni matière ne peuvent se déplacer plus vite que la lumière

$$c \approx 300\,000 \text{ km/s}$$

- Qu'en est-il de la gravité ?



Relativité générale (1915) : théorie **dynamique** de la gravité, la matière impacte la géométrie de l'espace-temps, qui en retour détermine comment la matière se déplace

Origine du concept – Première solution

• Première solution *exacte* découverte par Karl Schwarzschild en 1915 (alors qu'il se trouvait sur le front de l'est)

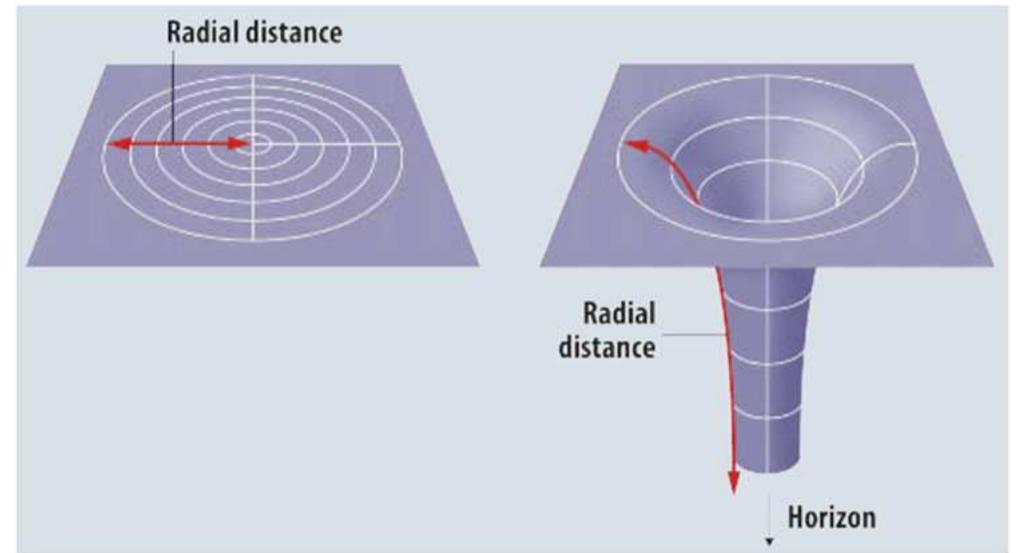
• Singularité au rayon de Schwarzschild :

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$



• Prédictions étranges : le temps se « figerait » à cet horizon ? La lumière ne pourrait s'en échapper ?

• Einstein lui-même ne l'a pas totalement acceptée, même si ses prédictions à grande distance étaient vérifiées



Origine du concept – Première solution

• Première solution *exacte* découverte par Karl Schwarzschild en 1915 (alors qu'il se trouvait sur le front de l'est)

• Singularité au rayon de Schwarzschild :

$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$



• Prédictions étranges : le temps se « figerait » à cet horizon ? La lumière ne pourrait s'en échapper ?

• Einstein lui-même ne l'a pas totalement acceptée, même si ses prédictions à grande distance étaient vérifiées

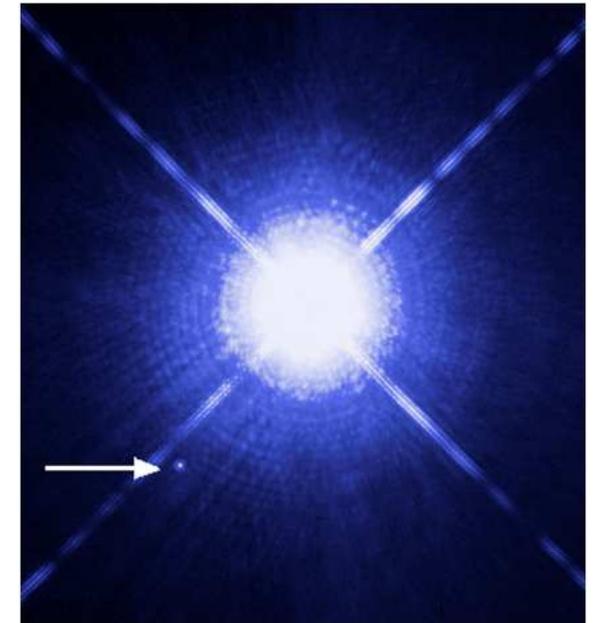
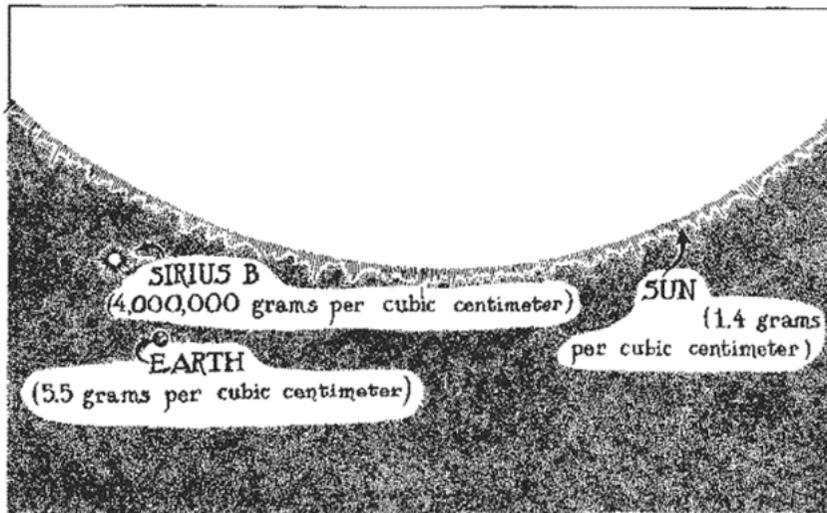
$$M = M_{\odot} \Rightarrow R_s \approx 3 \text{ km}$$

Comparer au rayon du soleil

$$R_{\odot} \approx 700\,000 \text{ km}$$

Origine du concept – Naines blanches

- Découvertes dans les années 1870
- Masses proches de celle du Soleil, mais *très* compactes
- Quelle force supporte la gravité ? D'où proviennent les naines blanches ?



Sirius A et Sirius B (la naine blanche)

Origine du concept – Évolution stellaire

- La plupart des étoiles se trouvent sur la « séquence principale »
- Au fil du temps, une étoile se contracte, devenant de plus en plus lumineuse
- L'équilibre d'une étoile est gouverné par la compétition entre sa propre gravité et la pression thermique
- Que se passe-t-il lorsqu'elle ne peut plus émettre assez de chaleur ?

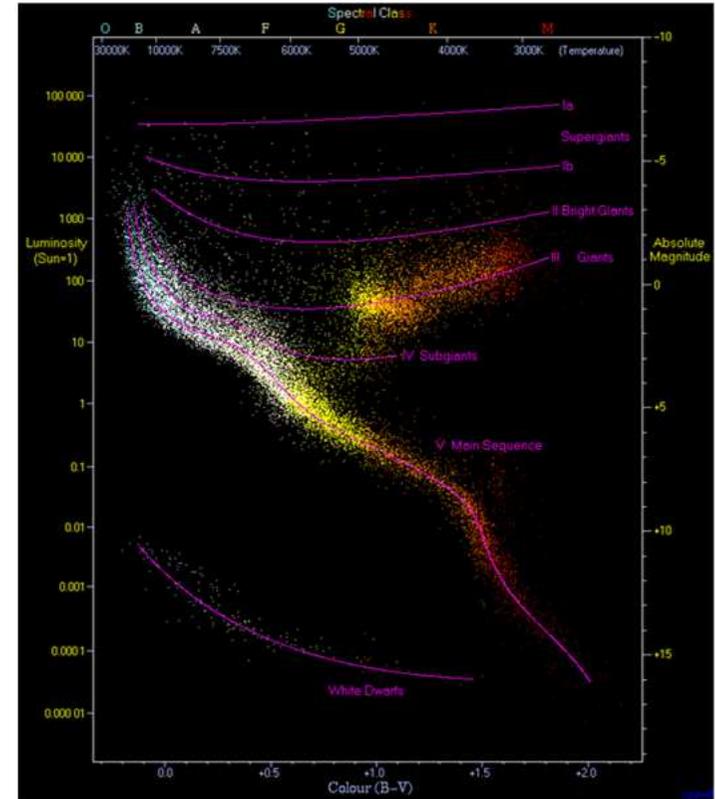
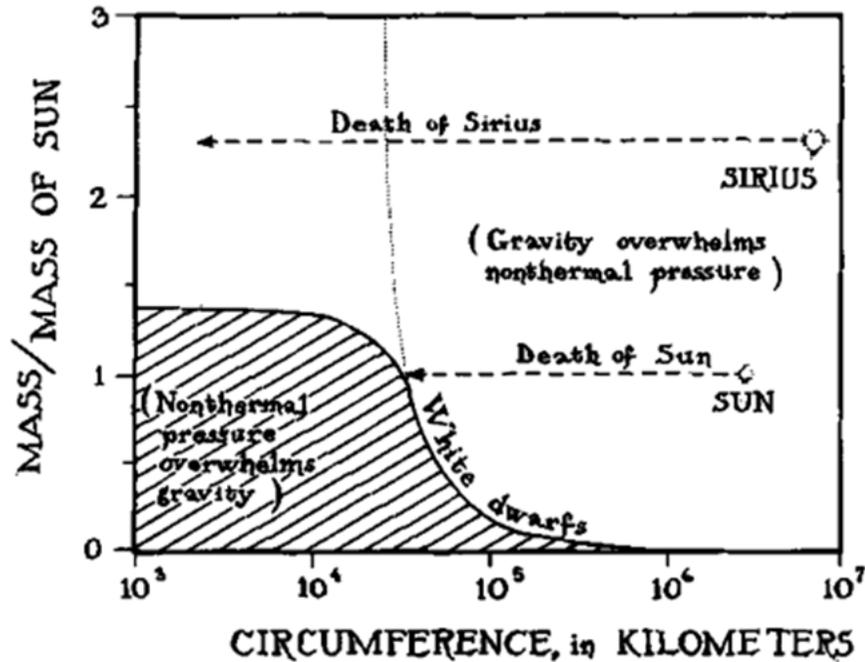


Diagramme de Hertzsprung-Russell (température / luminosité)

Origine du concept – Une masse maximale !



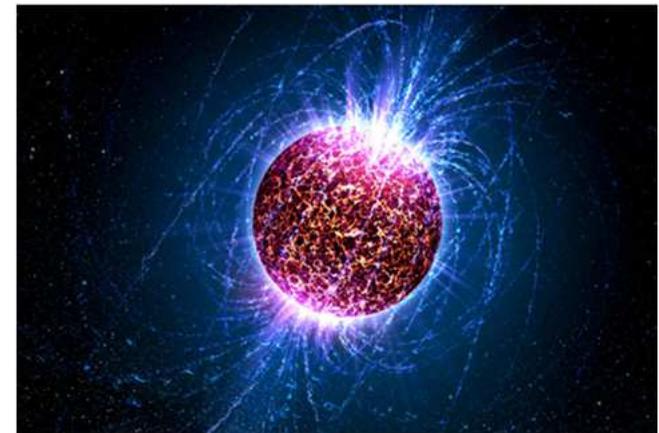
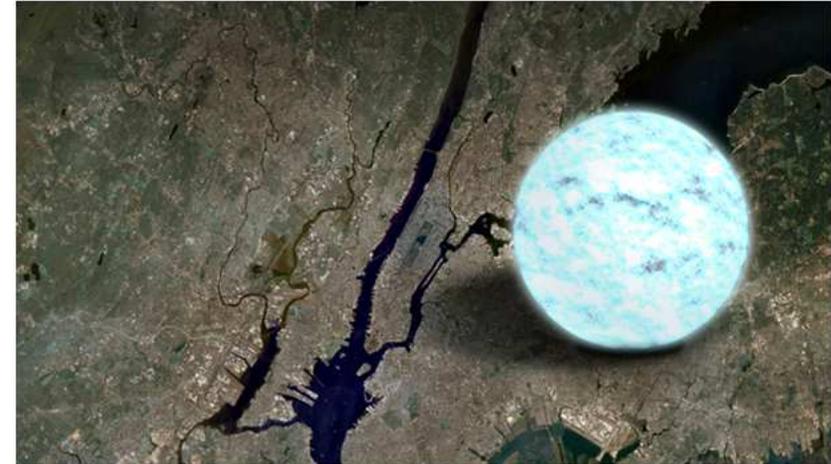
- Chandrasekhar a dérivé l'origine de la pression dans les naines blanches
- Son résultat implique une masse maximale des naines blanches :

$$M_{\max} = 1.4 M_{\odot}$$

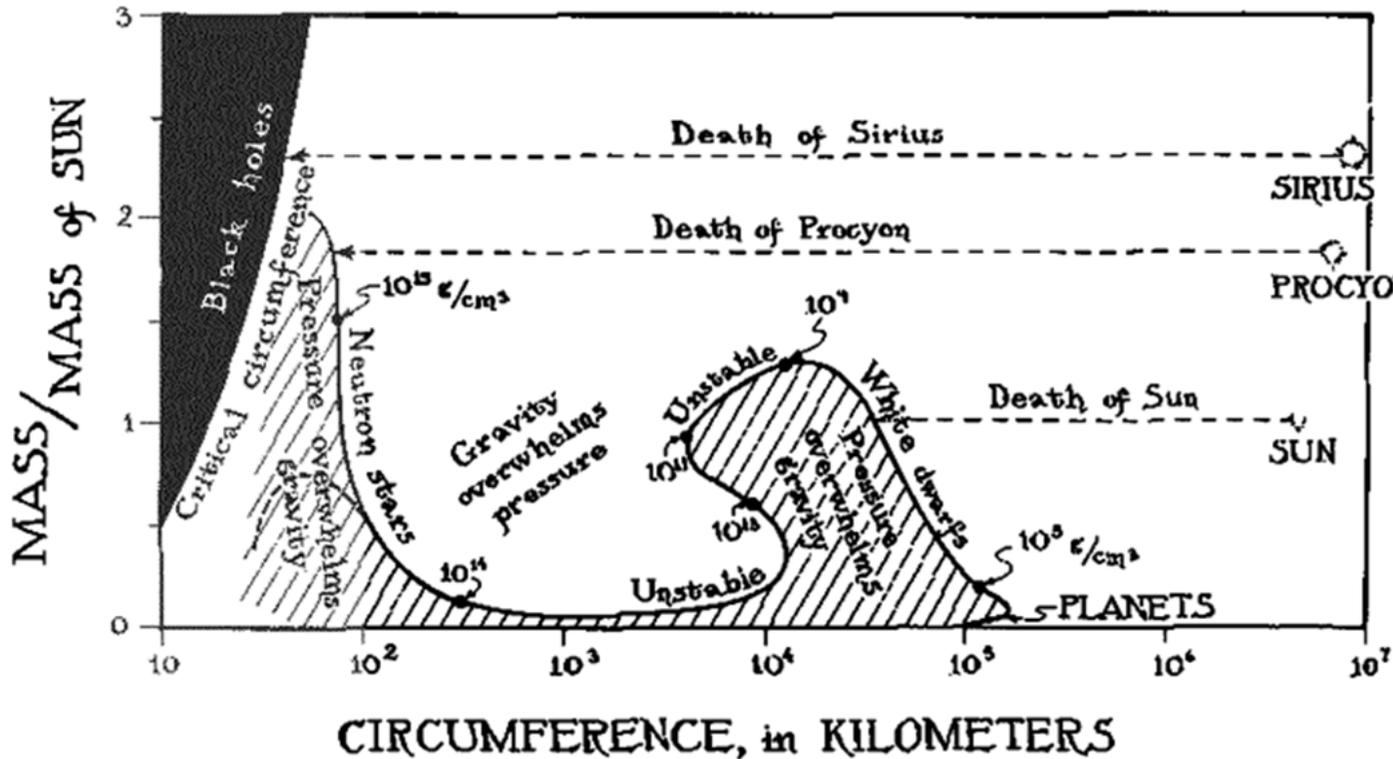
- Une étoile de faible masse va tendre vers une naine blanche. Qu'en est-il des étoiles massives ?
- Controverse entre Chandrasekhar et Eddington (le même!)

Origine du concept – Étoiles à neutrons

- Hypothèse de Lev Landau, indépendamment de Franck Zwicky après la découverte du neutron, dans les années 1930
- Laboratoires de l'extrême : une masse solaire dans un rayon de 10 km ! Champ magnétique très intense
- Équation d'état très complexe, mais il est aussi possible de montrer qu'une étoile à neutrons ne peut avoir une masse $\gtrsim 3M_{\odot}$



Origine du concept – Effondrement



En conclusion, rien n'empêche l'effondrement d'une étoile massive jusqu'au rayon de Schwarzschild, donc la formation d'un trou noir !

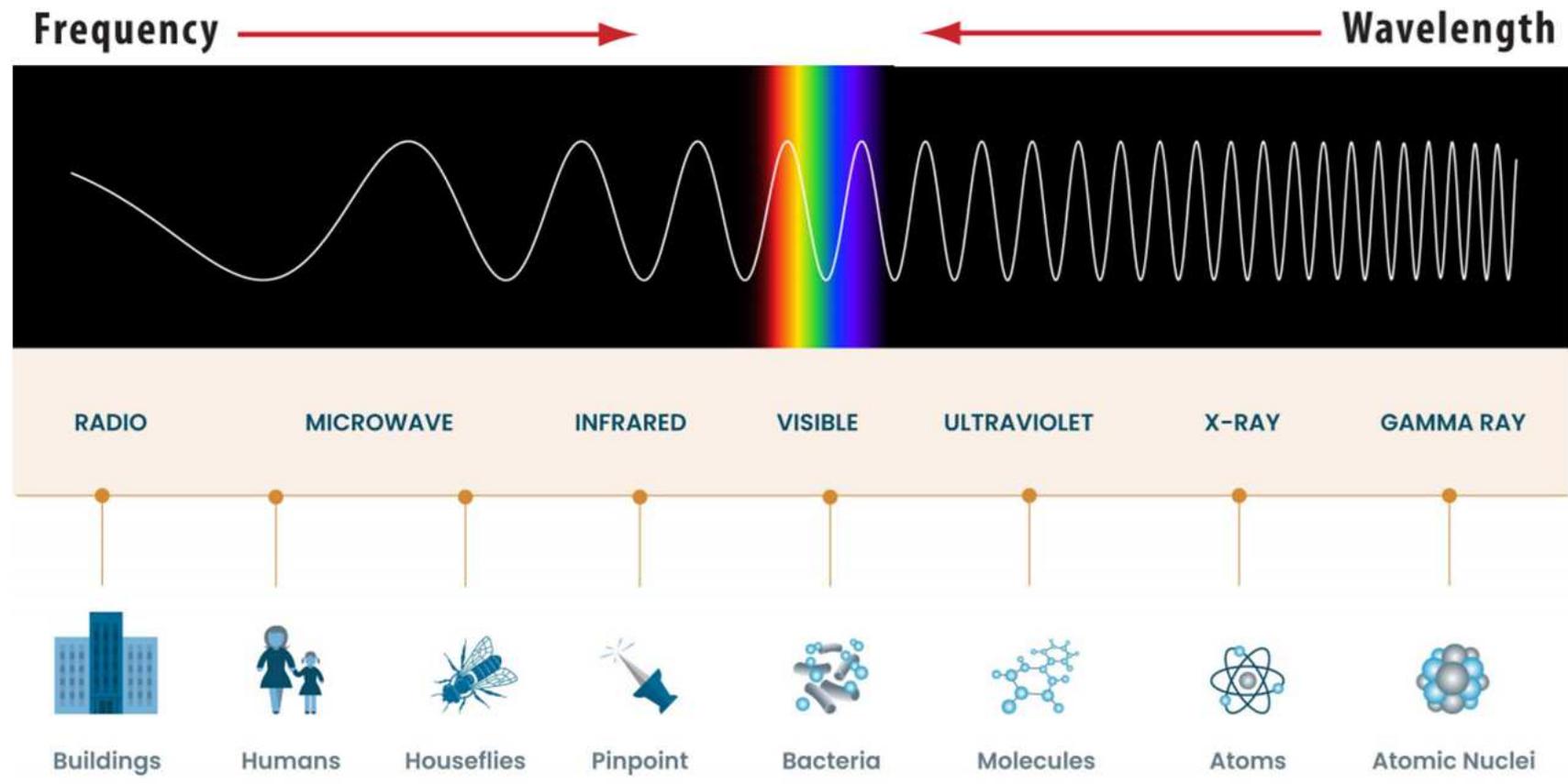
(En réalité, une étoile peut perdre de la masse au cours de son effondrement. Cela ne suffit toutefois pas à empêcher des étoiles très massives de former des trous noirs,)

Origine du concept – Quelques idées reçues

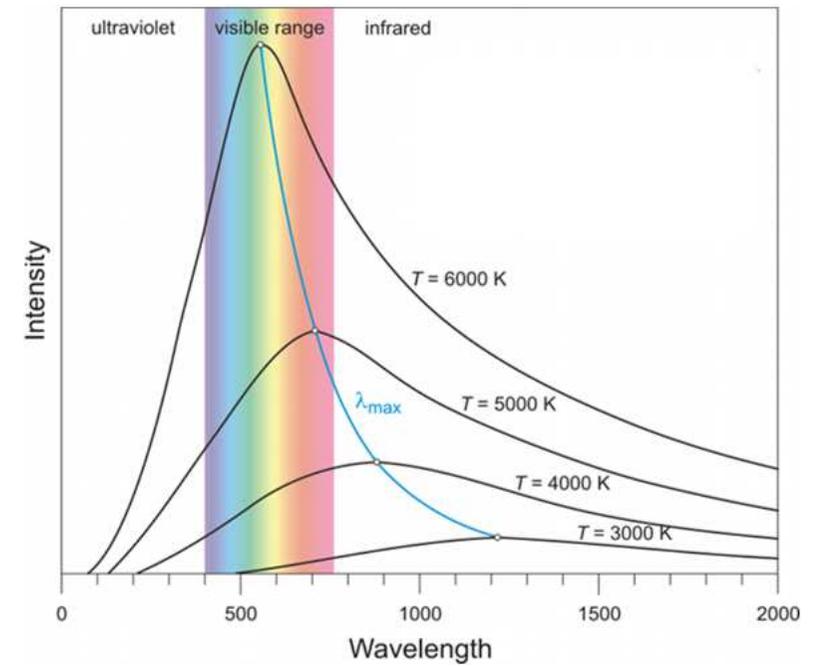
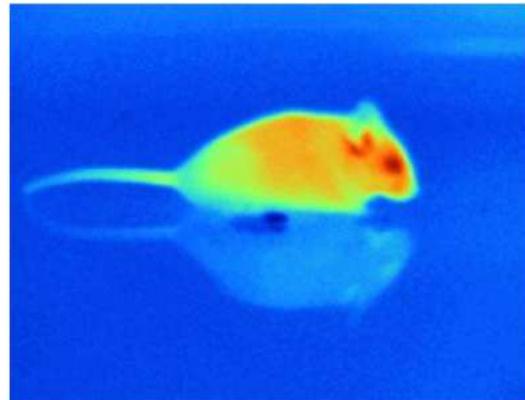
- Les trous noirs ne sont pas des « aspirateurs cosmiques »
- Loin d'un trou noir, son attraction est la même que celle d'une étoile de même masse
- Du point de vue d'un observateur lointain, un astronaute tombant dans le trou noir irait effectivement de plus en plus lentement, jusqu'à « geler » au rayon de Schwarzschild (l'horizon des événements).
- Du point de vue de l'astronaute, en revanche, il n'y a pas de singularité !
- Une fois l'horizon passé, il n'y a pas de retour en arrière possible.

(Il y a une singularité au centre du trou noir en revanche. Personne n'a pu prédire les lois physiques à l'œuvre à cette singularité.)

Trous noirs stellaires – Le spectre électromagnétique

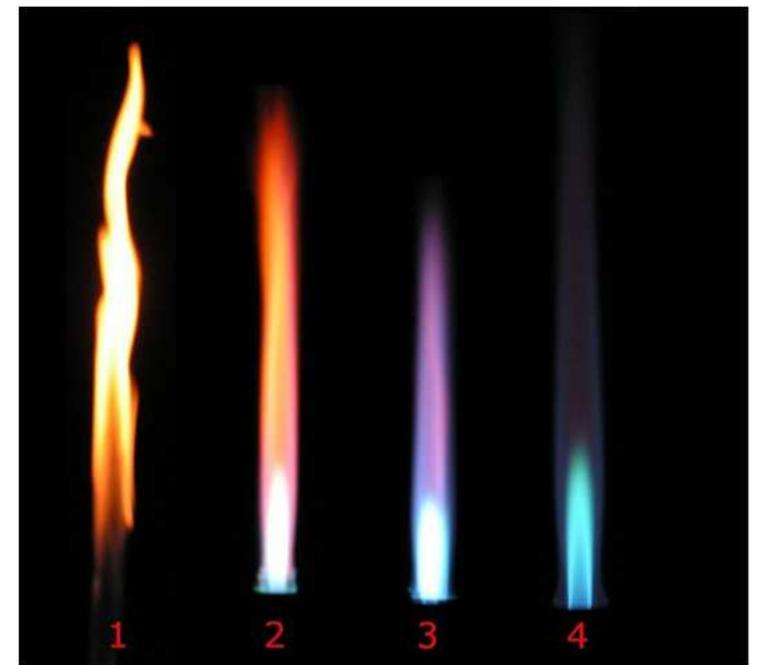
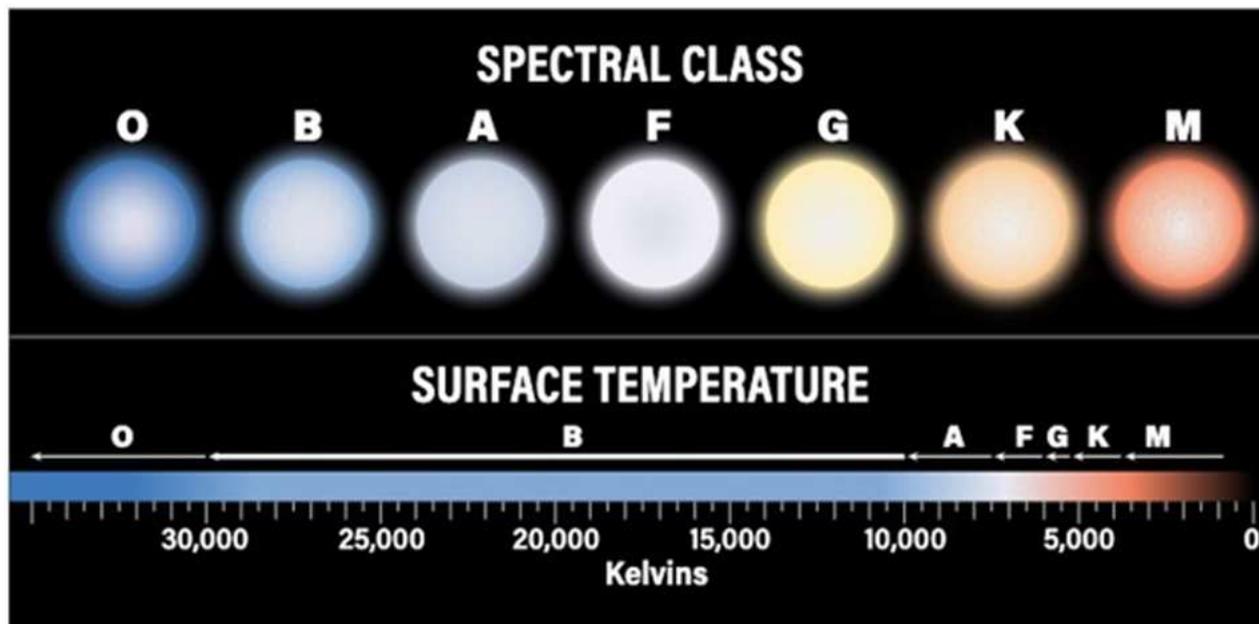


Trous noirs stellaires – Rayonnement du corps noir



Trous noirs stellaires – Rayonnement du corps noir

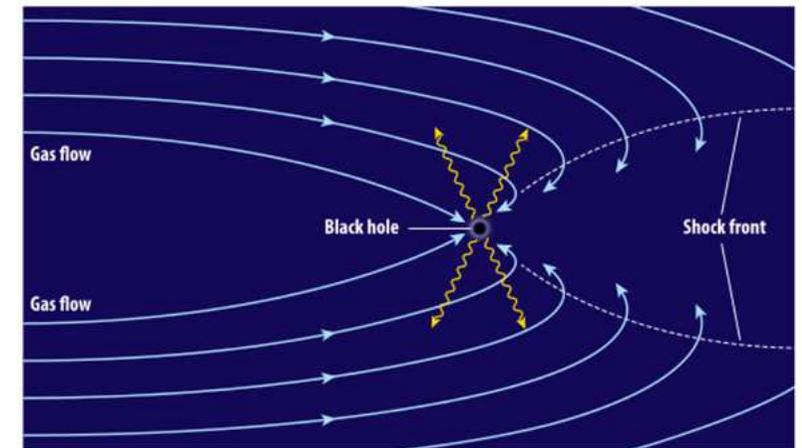
Loi du déplacement de Wien : $\lambda_{\max} = 482 \left(\frac{6000 \text{ K}}{T} \right) \text{ nm}$



Trous noirs stellaires – Accrétion

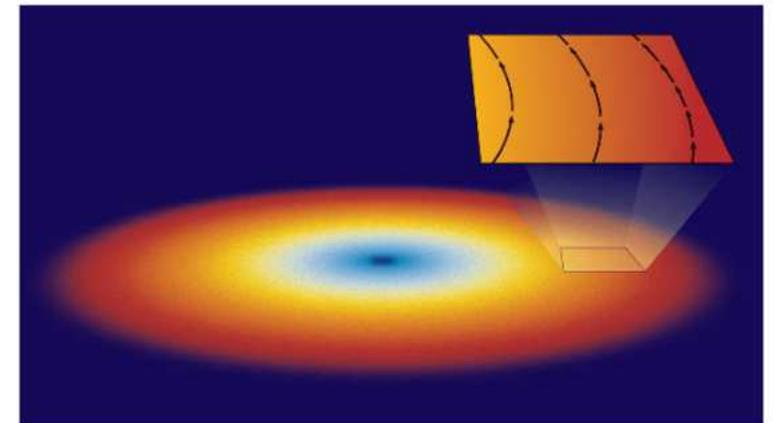
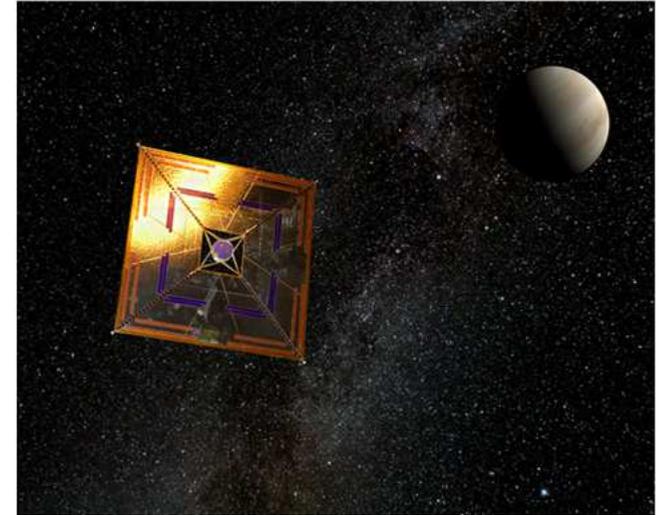
Comment observer un trou noir ? *Par le rayonnement du gaz qui l'entoure !*

- Accrétion de gaz par le trou noir : puits gravitationnel très profond (car très compact), gaz acquiert une vitesse relativiste !
- Si tout tombe dans le trou noir, aucune signature
- Le gaz peut former un disque d'accrétion ou des chocs, chauffer, et émettre un rayonnement !



Trous noirs stellaires – Accrétion

- Si le gaz chauffe trop, la pression de radiation peut stopper l'accrétion !
- Luminosité maximale d'Eddington (le même!) :
- Température du gaz : $T \approx 10^7$ K
- D'après la loi de Wien, le disque peut émettre des rayons X si la luminosité est proche de celle d'Eddington



Trous noirs stellaires – Astronomie des rayons X

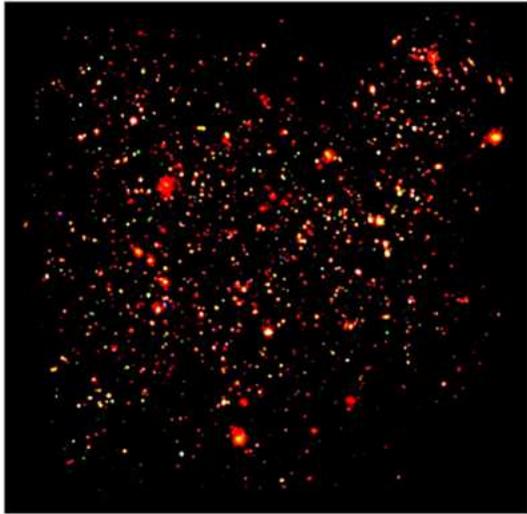


L'atmosphère est opaque aux rayons X... Les premiers télescopes aux rayons X ont donc été montés sur des fusées, pour 4 min de données utilisables !



Riccardo Giacconi

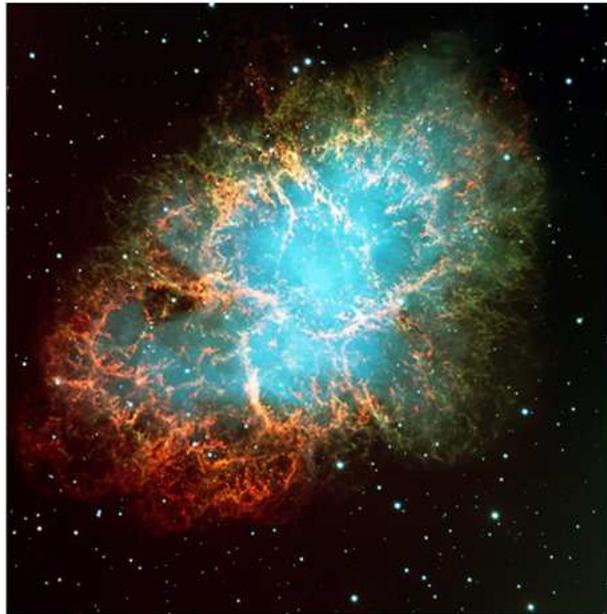
Trous noirs stellaires – Astronomie des rayons X



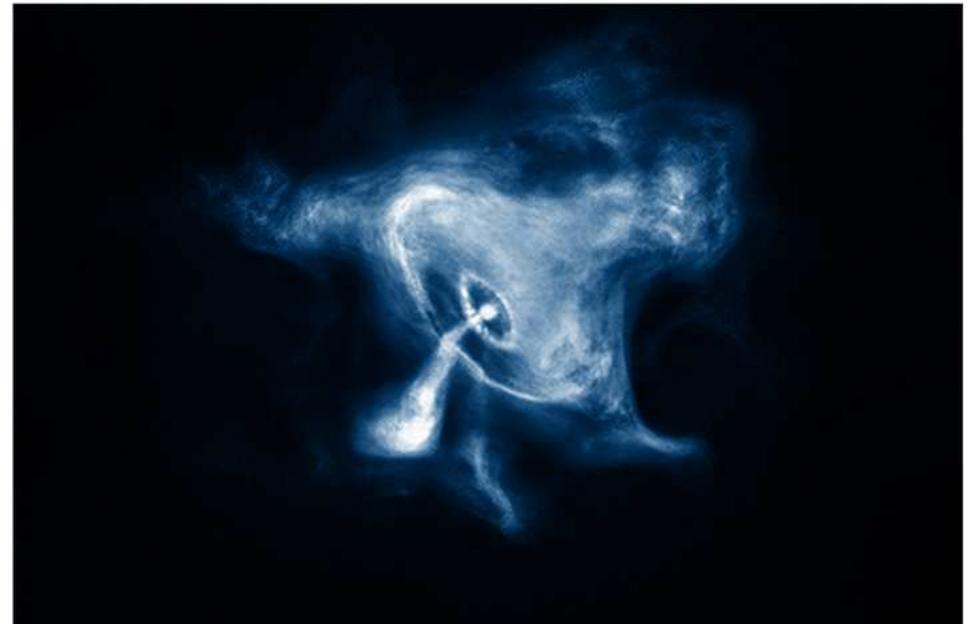
- Nouvelle fenêtre sur l'univers, sondant les hautes énergies (détecteurs maintenant montés sur satellites)
- Ces observations ont vite montré l'existence de sources ponctuelles (Sco X-1, Cyg X-1) aussi brillantes que le Soleil, ce qui était une surprise !
- Ces sources sont de surcroît variables. Certaines pulsent (étoiles à neutrons ?), d'autres scintillent très rapidement (trous noirs ?)

Trous noirs stellaires – Le spectre électromagnétique

Exemple : la nébuleuse du Crabe



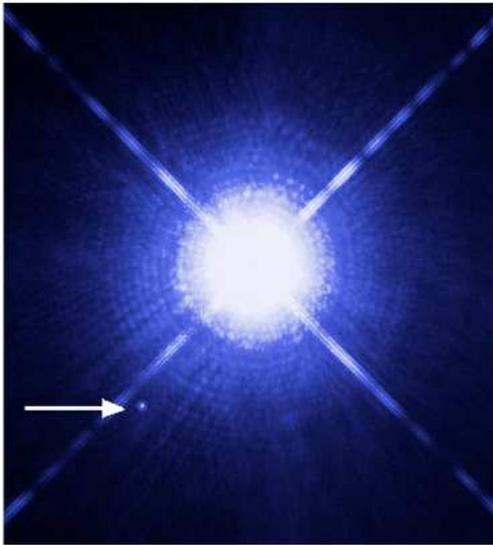
*En optique, avec le
téléscope Hubble*



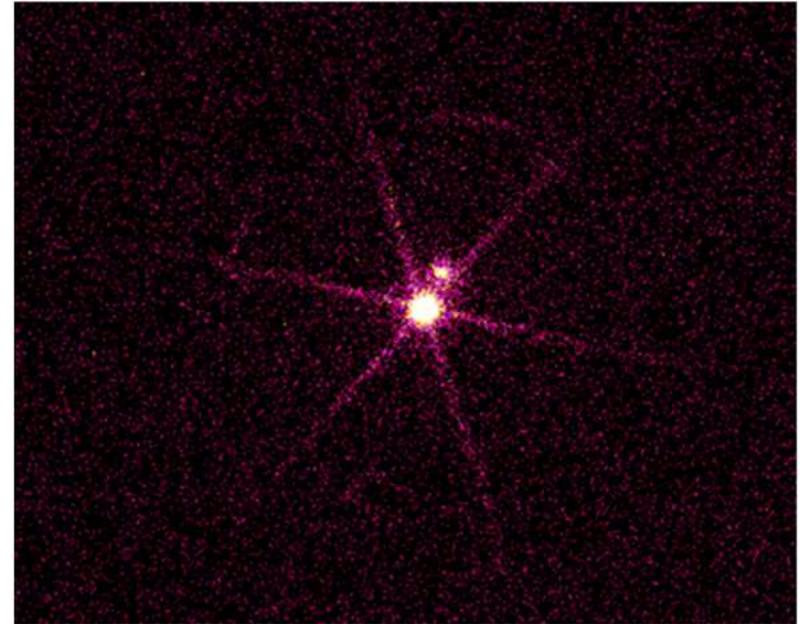
*Aux rayons X, avec le
téléscope Chandra*

Trous noirs stellaires – Le spectre électromagnétique

Exemple : Système binaire Sirius

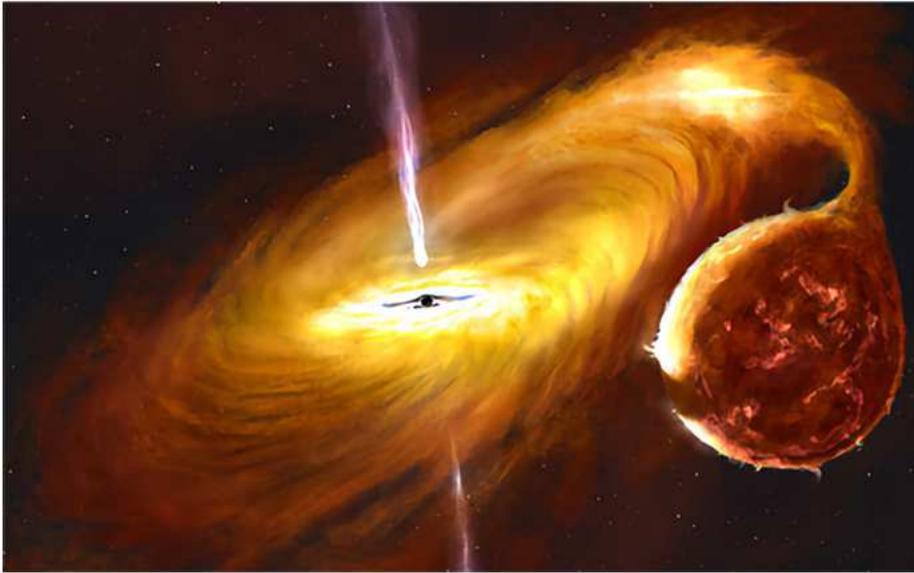


*En optique, avec le
télescope Hubble*



*Aux rayons X, avec le
télescope Chandra*

Trous noirs stellaires – Binaires X



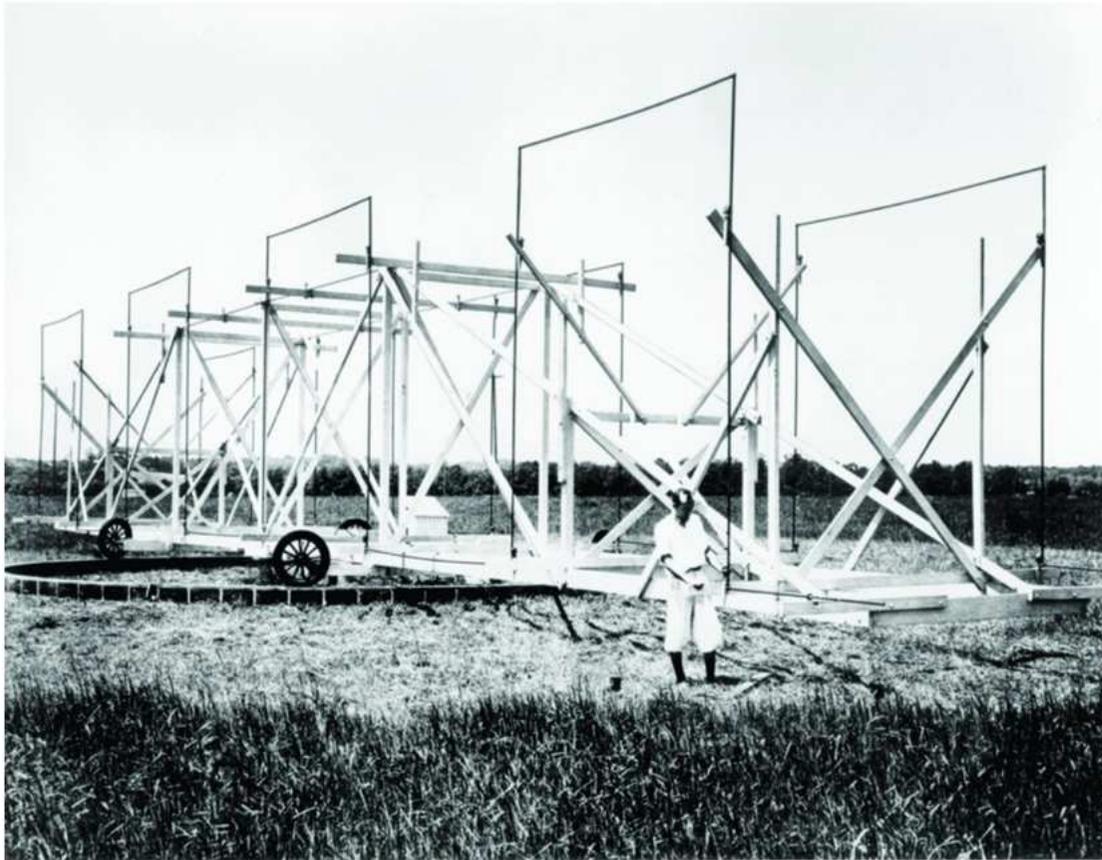
Note : la plupart des binaires X ont des luminosités inférieures, mais proches de la luminosité d'Eddington

- Systèmes binaires, comportant un objet compact (étoile à neutron/trou noir) et une étoile
- L'étoile fournit du gaz à l'objet, qui en accrétant forme un disque
- La variabilité et la luminosité seules ne suffisent pas à déterminer la nature de l'objet compact
- Si on distingue l'étoile, on peut mesurer son orbite pour obtenir la masse de l'objet !

Trous noirs stellaires – Un trou noir dans Cyg X-1 ?!

- Les astronomes ont dans les années 1970 réussi à repérer l'étoile compagnon, orbitant autour d'un objet invisible en optique mais brillant en rayons X
- La masse estimée de l'objet compact, par la mesure de l'orbite de l'étoile, est supérieure à la masse maximale d'une étoile à neutrons

Trous noirs supermassifs – Astronomie radio

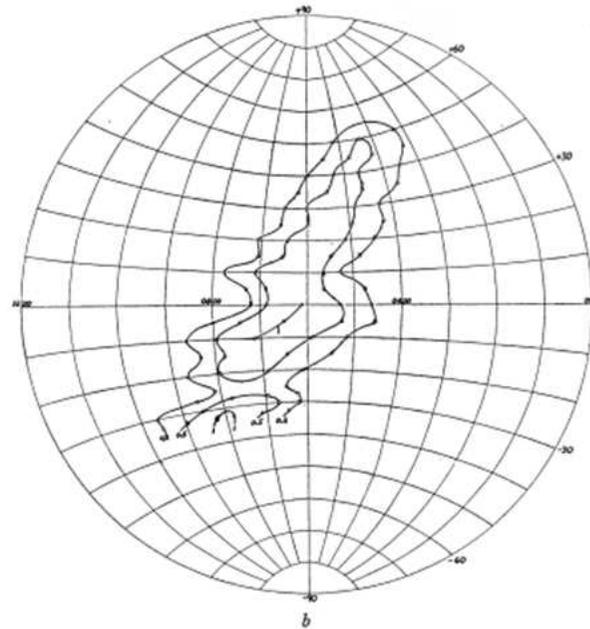
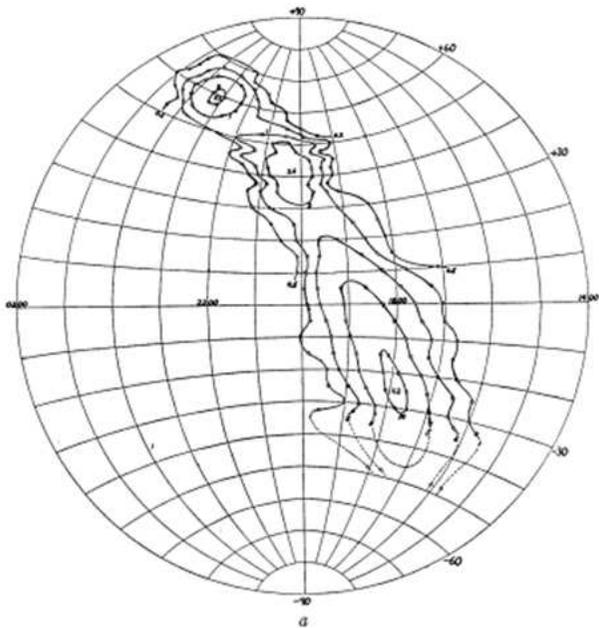


• Première détection de signaux radio extraterrestres en 1931 par Karl Jansky

• Ingénieur à Bell Labs, New Jersey, désireux de réduire les interférences des appels transatlantiques...



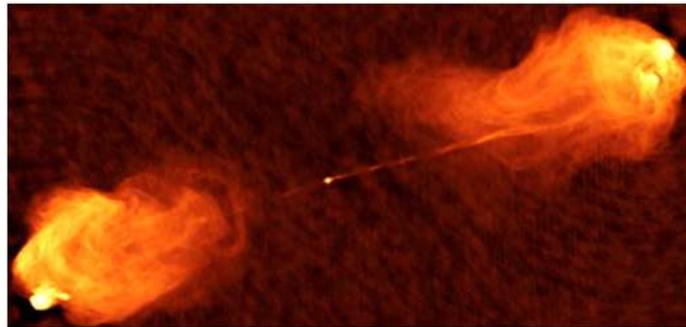
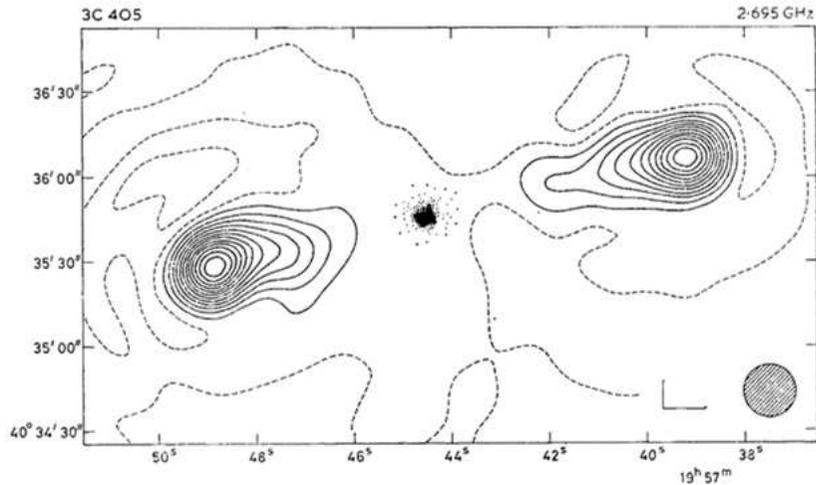
Trous noirs supermassifs – Astronomie radio



Cartes d'intensité radio (Reber, 1944)

- Première carte radio avec sources extragalactiques
- Une nouvelle fenêtre sur l'univers, complémentaire avec l'optique !
- Source particulièrement intense : Cyg A (constellation du cygne)

Trous noirs supermassifs – Interférométrie radio



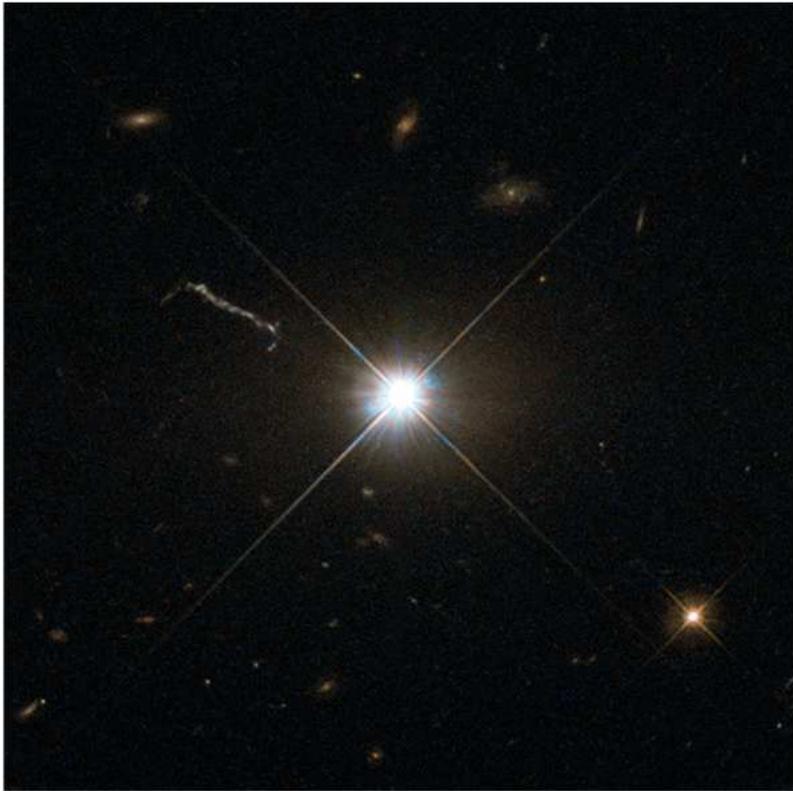
Cyg A, bien résolue, est identifiée en optique avec une galaxie peu lumineuse....

Cyg A (années 1960)

Cyg A (années 2000)

- La source Cyg A montre en réalité deux lobes, connectés à un noyau brillant par un trait fin : activité du noyau galactique ?
- Puissance estimée gigantesque, un million de fois plus lumineux que les binaires X

Trous noirs supermassifs – Quasars



- D'autres sources radio sont ponctuelles, même à très haute résolution : 3C 273
- En 1963, la position de cette source a été déterminée très précisément par occultation lunaire (!)
- Concomitant avec une source optique étrange, ponctuelle, lumineuse, avec un spectre quasi stellaire, mais des lignes d'émission inconnues

Trous noirs supermassifs – Quasars

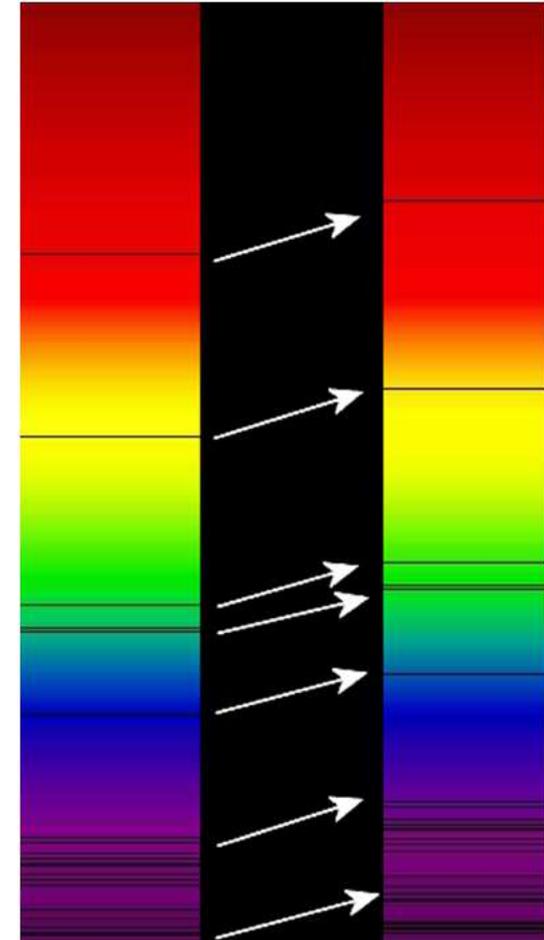


Table 1. WAVE-LENGTHS AND IDENTIFICATIONS

λ	$\lambda/1.158$	λ_0	
3239	2797	2798	Mg II
4595	3968	3970	H ϵ
4753	4104	4102	H δ
5032	4345	4340	H γ
5200–5415	4490–4675		
5632	4864	4861	H β
5792	5002	5007	[O III]
6005–6190	5186–5345		
6400–6510	5527–5622		

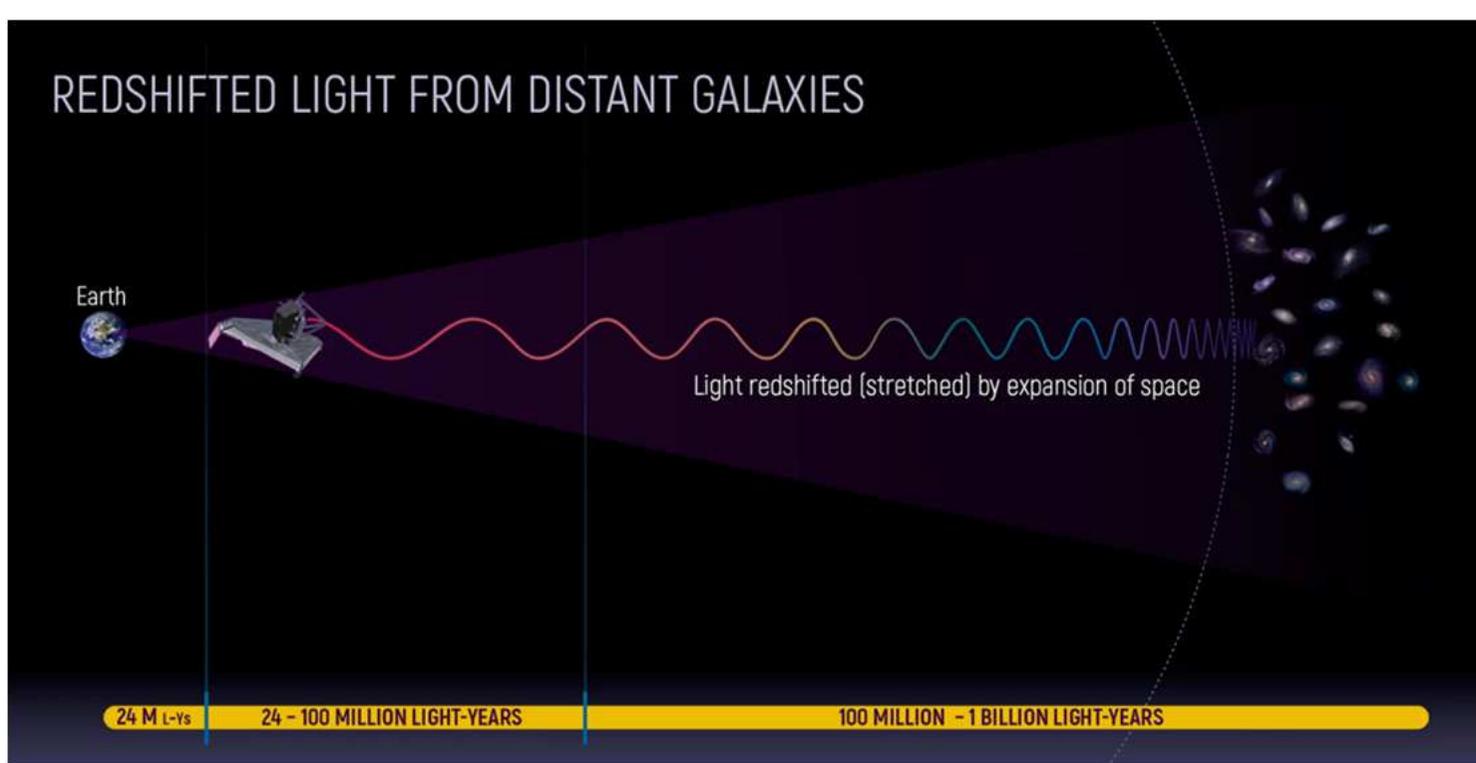
Measured

Tabulated



Maarten Schmidt a réalisé que ces raies étaient émises par l'hydrogène, mais avec un redshift de 0,16 !!

Trous noirs supermassifs – Effet Doppler cosmologique



L'effet Doppler permet de mesurer la distance à des galaxies lointaines, qui s'éloignent de nous de par l'expansion de l'Univers

3C 273 est donc distante de plus de 2 milliards d'années-lumière !
C'est la source la plus puissante dans le ciel

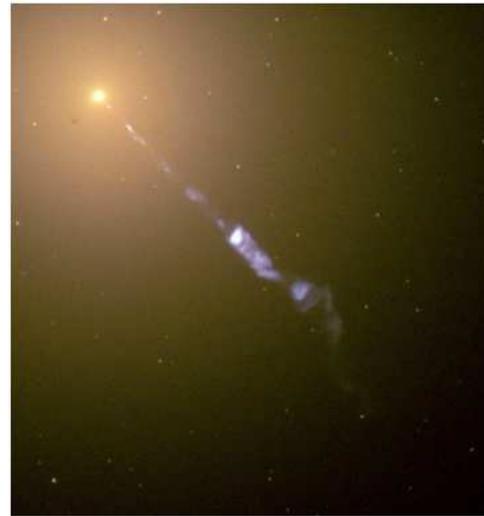
Trous noirs supermassifs – Quasars



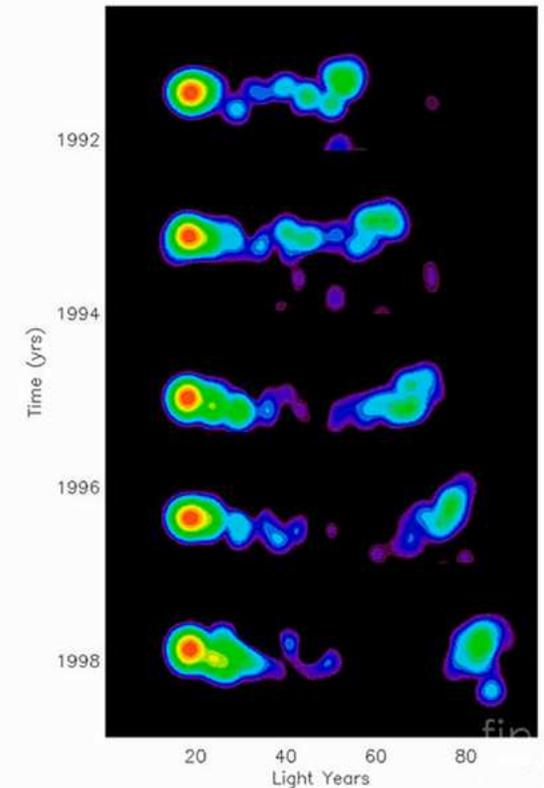
- Il est possible, à l'aide d'un obturateur, d'imager la galaxie hôte de 3C 273, confirmant l'origine cosmologique du redshift
- Certains AGN sont très lumineux en radio (Cyg A, M87), mais pas tous
- Intensité très variable, implique un noyau très compact !
- De manière générale, les noyaux de galaxies sont « actifs » (AGN), et peuvent être 100 fois plus lumineux que l'ensemble des étoiles de la galaxie hôte

Trous noirs supermassifs – Jets

- Les jets sont observés jusqu'au plus proche du noyau
- Leur taille montre la stabilité de l'activité des AGN (millions d'années)
- Les jets sont propulsés à des vitesses relativistes, à 0,999 fois la vitesse de la lumière



Jet de M87
(optique)



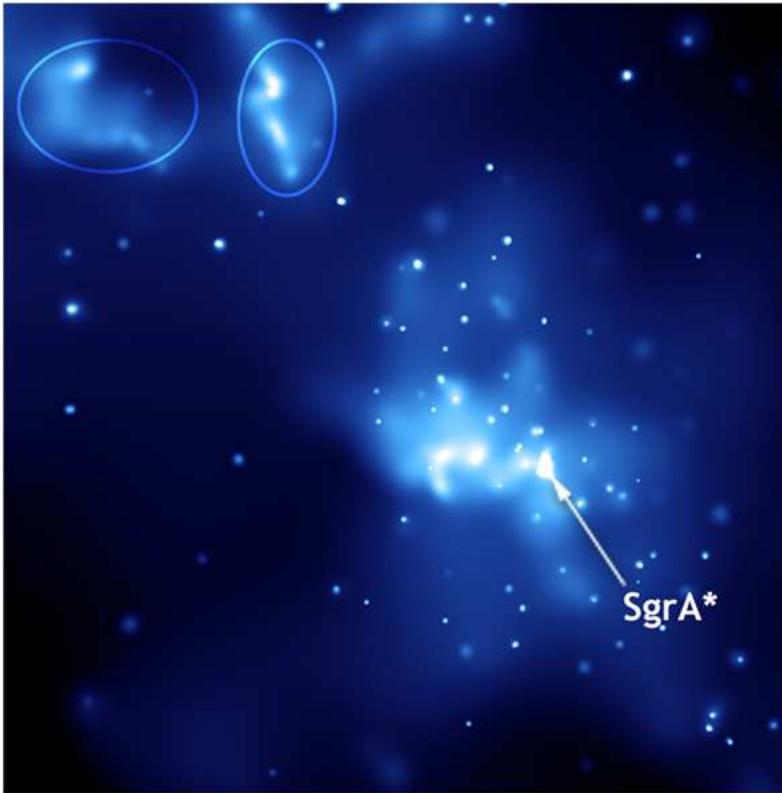
Jet de 3C279
(radio)

Trous noirs supermassifs – Objet compact

Les contraintes de taille (par la variabilité), masse (par la luminosité d'Eddington) et de stabilité (par les jets) indiquent qu'un AGN est alimenté par un trou noir supermassif



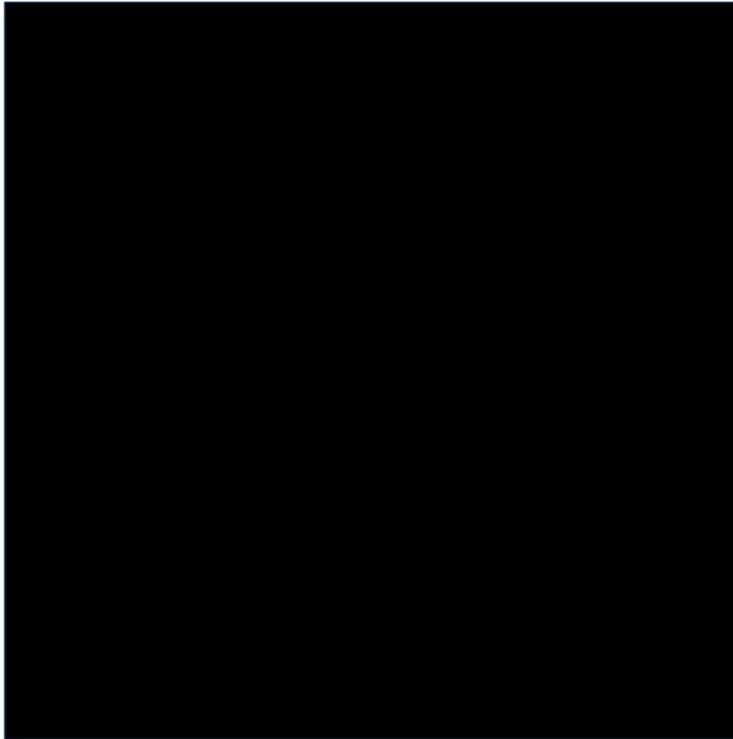
Perspectives modernes – Le centre galactique



Centre galactique observé aux rayons X
par *Chandra*

- Si toute galaxie a un noyau, la nôtre aussi ! Il est situé dans la constellation du Sagittaire, Malheureusement, caché dans le visible par la poussière du disque galactique
- Forte densité d'étoiles, gaz et filaments radio, halo de rayons X
- Au centre, une source radio de faible intensité, sans mouvement propre : Sgr A*

Perspectives modernes – Le centre galactique



- Des observations poussées (interférométrie infra-rouge, optique adaptative) ont permis de résoudre les étoiles en orbite autour de Sgr A*
- Contraintes sur la masse centrale et la taille de la distribution de masse
- Sgr A* pèse plusieurs millions de masses solaires, mais émet très peu ! La seule possibilité est que ce soit un trou noir
- Tous les trous noirs supermassifs ne sont pas des monstres. Activité passée ?

Crédits : Andrea Ghez

Perspectives modernes – Le centre galactique

the combined H+K-band grating with a spectral resolution of $R \approx 1500$.

For more details on the data analysis of all three instruments, we refer to Appendix A.

3. Results

3.1. Relativistic corrections

The left panel of Fig. 2 shows the combined single-telescope and interferometric astrometry of the 1992-2018 sky-projected orbital motion of S2, where the zero point is the position of the central mass and of Sgr A*. All NACO points were corrected for a zero-point offset and drift in R.A./Dec., which are obtained from the orbit fit. The bottom right panel zooms into the 2018 section of the orbit around pericentre measured with GRAVITY. The zoom demonstrates the hundred-fold improvement of astrometry between SHARP in the 1990s (≈ 4 mas precision) and NACO in the 2000s (≈ 0.5 mas) to GRAVITY in 2018 (as small as $\approx 30 \mu\text{as}$). While the motion on the sky of S2 could be detected with NACO over a month, the GRAVITY observations detect the motion of the star from day to day. The upper right panel of Fig. 2

displays the radial velocity measurements with VLT and NIRC2 at Keck in the 1992-2018 period.

At pericentre R_{peri} , S2 moves with a total of ≈ 7650 km/s, or $\beta = v/c = 2.55 \times 10^{-2}$. The first-order parameterised post-Newtonian (PPN(1)), due to Special and General Relativity, orbital Doppler and Rømer effects, are within measurement precision, $\text{PPN}(1) \sim \beta^2 \sim (R_S/R_{\text{peri}})^2$. These terms can be parameterised spectroscopically (see e.g. Perlmutter et al. 1973; Alexander 2005; Zucker et al. 2018)

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = B_0 + B_{0.5}\beta + B_1\beta^2 + O(\beta^3),$$

where the PPN(1)_z term $B_1 = B_{1,TD} + B_{1,gr}$, with $B_{1,TD}$ and $B_{1,gr}^2 = [R_S(1+e)]/[2a(1-e)] = 6.51 \times 10^{-4}$ for semi-major axis a and e is the eccentricity of the orbit. The Newtonian Doppler shift.

Eq. (1) indicates that PPN(1)_z consists in special relativistic transverse Doppler effect ($B_{1,TD}$), general relativistic gravitational redshift ($B_{1,gr}$), total redshift at pericentre, while at apocentre, it is

Article number

• Ces étoiles sont utilisées pour effectuer des tests fins de relativité générale !

• Sgr A* émet tout de même des éruptions en rayons X... activité mal comprise

The Nobel Prize in Physics 2020



III, Niklas Elmehed. © Nobel Media.
Roger Penrose
Prize share: 1/2

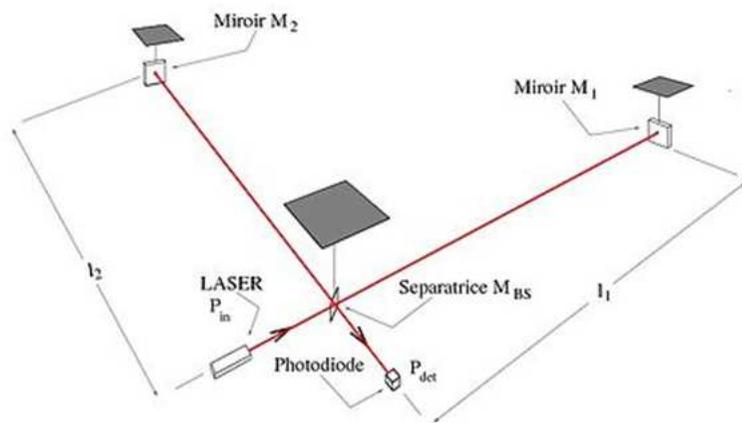
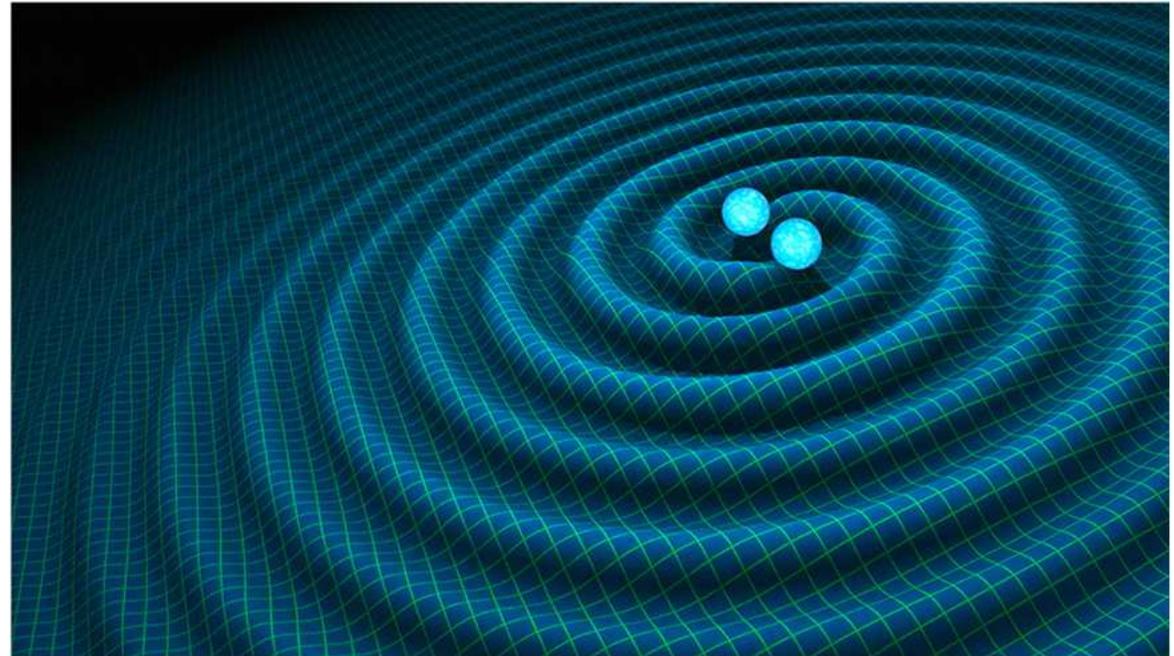
III, Niklas Elmehed. © Nobel Media.
Reinhard Genzel
Prize share: 1/4

III, Niklas Elmehed. © Nobel Media.
Andrea Ghez
Prize share: 1/4

Redshift d'une étoile en orbite proche et prédiction théorique (Gravity Collaboration et al., 2018)

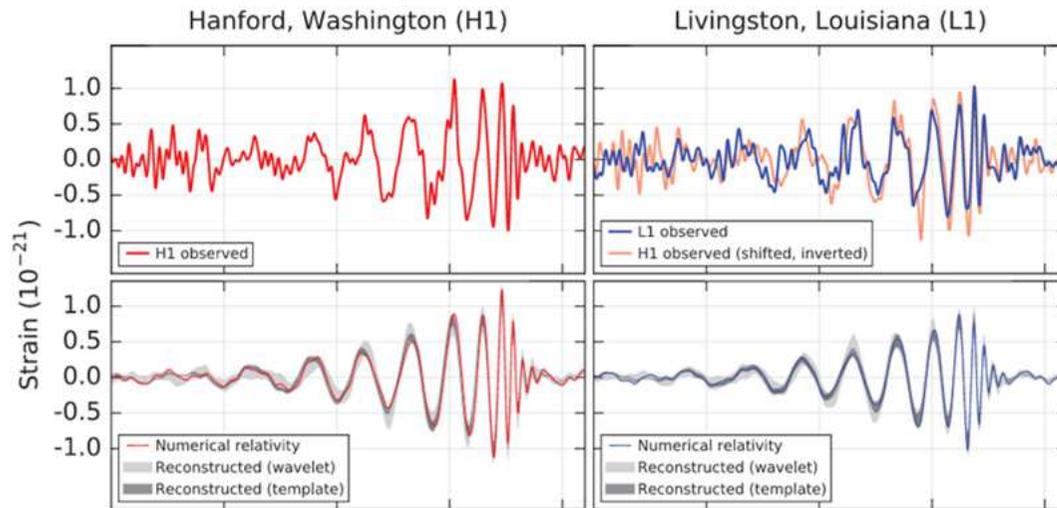
Perspectives modernes – Ondes gravitationnelles

- Prédiction de la relativité générale
- Les sources les plus intenses sont les plus compactes : binaires de trous noirs de masse stellaire !



Mesure à l'aide d'un interféromètre de Michelson, mesurant la minuscule variation de longueur provoquée par le passage de l'onde

Perspectives modernes – Ondes gravitationnelles



(Abbott et al. 2016)

Détectées pour la première fois en 2016 ; nouveau type d'ondes pour étudier l'univers !



LIGO LabVirgo

The Nobel Prize in Physics 2017



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Rainer Weiss
Prize share: 1/2



© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Barry C. Barish
Prize share: 1/4



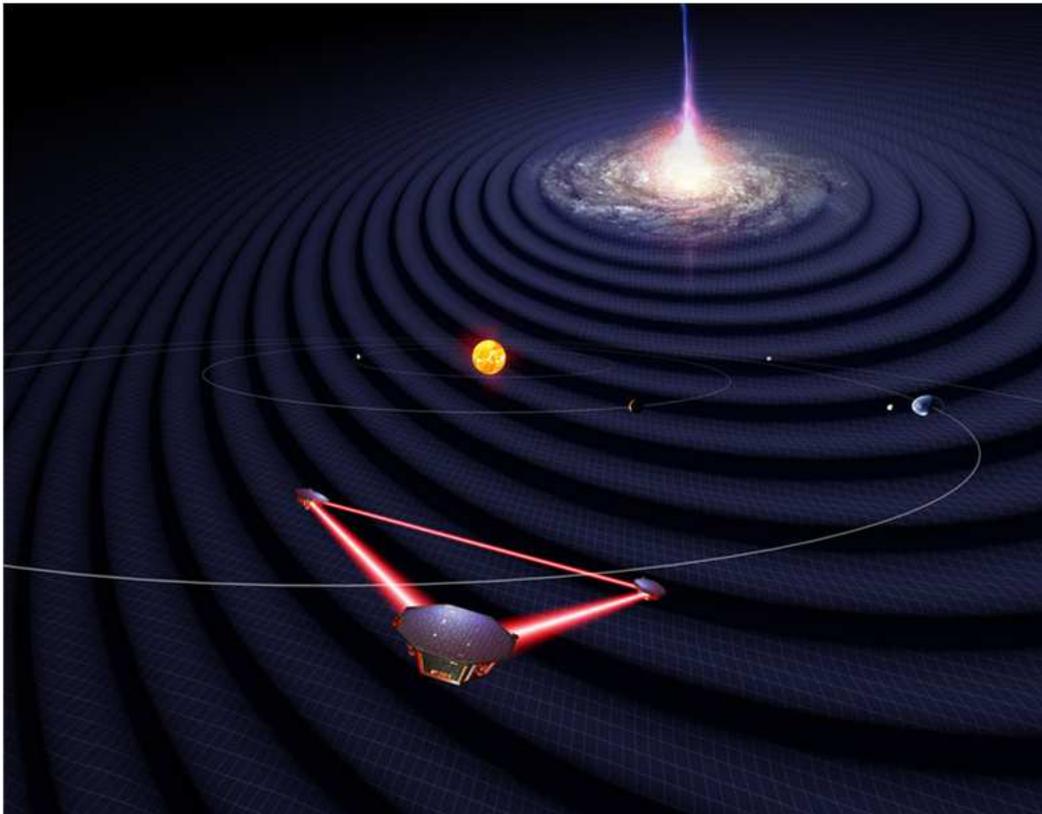
© Nobel Media. Ill. N. Elmehed
Kip S. Thorne
Prize share: 1/4

Perspectives modernes – Ondes gravitationnelles



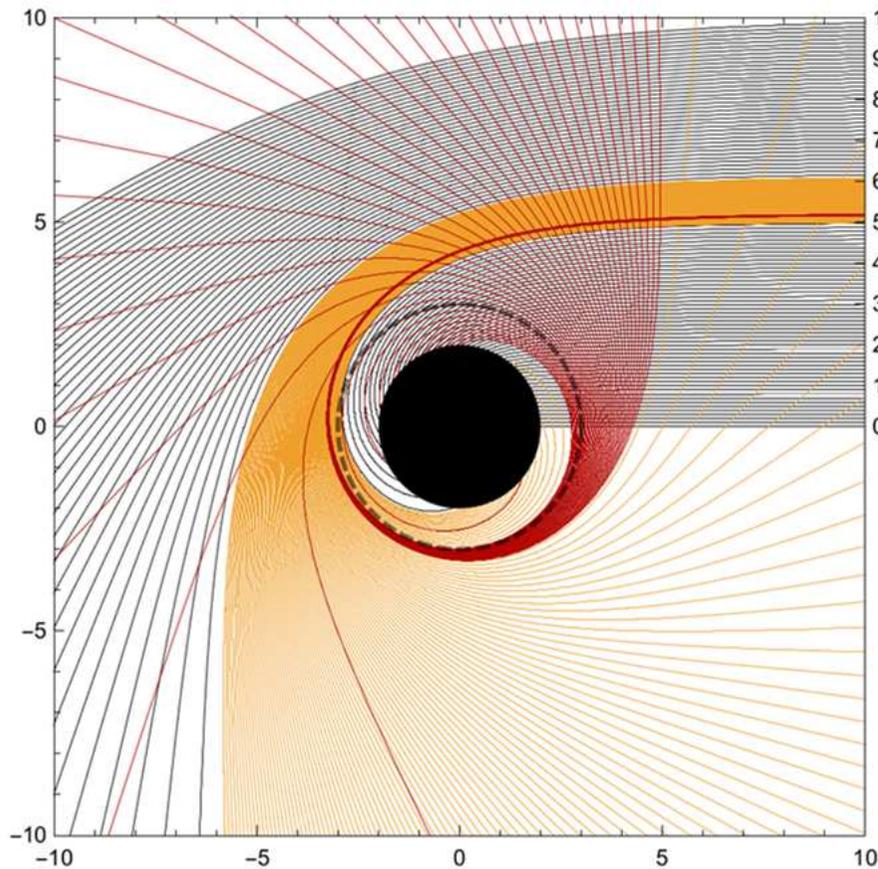
Il est maintenant possible d'étudier la population de trous noirs dans la galaxie, avec déjà des dizaines de coalescences mesurées

Perspectives modernes – Ondes gravitationnelles



- Future mission menée par l'ESA : LISA
- Interféromètre dans l'espace !
- Sensible à plus basse fréquences, informations sur les trous noirs supermassifs et primordiaux

Perspectives modernes – Photographie d'un trou noir



Gralla et al. 2020

- Comme souligné précédemment, une masse défléchit la lumière, peut agir comme une lentille
- Cas d'un trou noir : existence d'une orbite (instable) de photons, en pointillés à gauche
- Convergence et concentration des photons autour de cette orbite

Perspectives modernes – Photographie d'un trou noir



• Première estimation de l'image d'un trou noir par Jean-Pierre Luminet dans les années 1970 (bien avant Interstellar !)

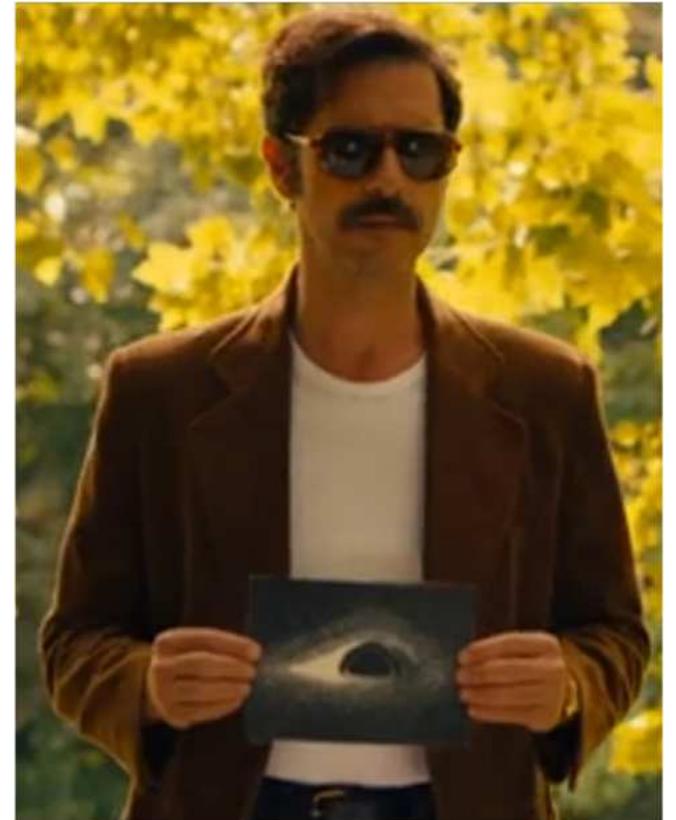
• Tracée à la main sur une plaque photographique, chaque point représente un photon



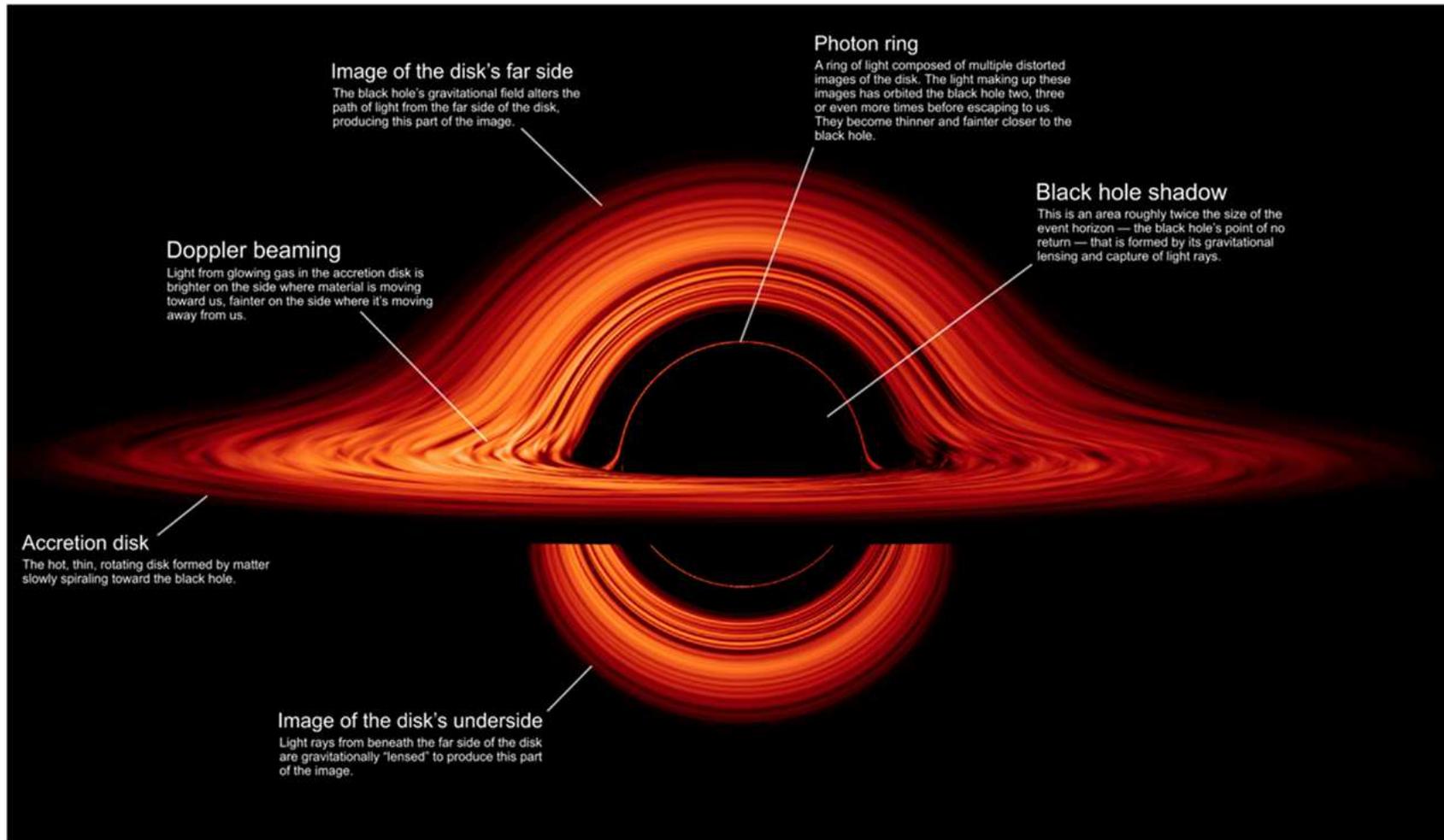
Perspectives modernes – Photographie d'un trou noir



Melvil Poupaud, dans la série *OVNI(S)*

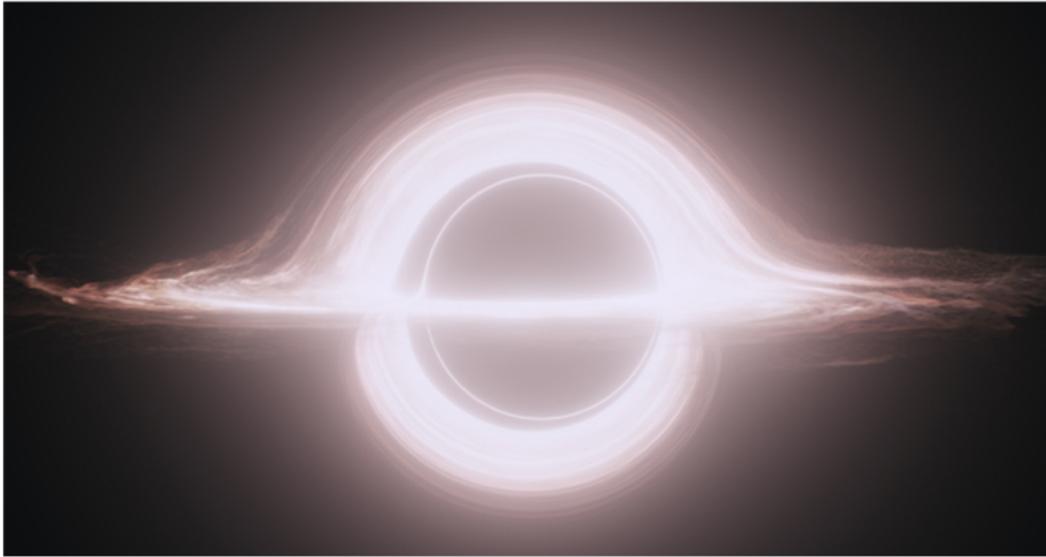


Perspectives modernes – Photographie d'un trou noir



Perspectives modernes – Photographie d'un trou noir

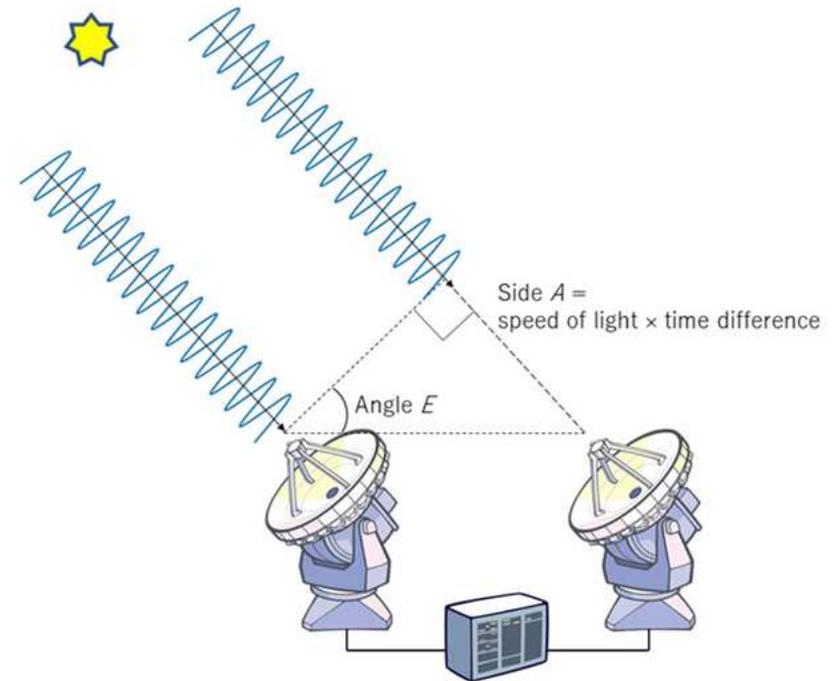
La science d'Interstellar !



Pas d'effet Doppler...

Perspectives modernes – Interférométrie radio

- Résolution d'un télescope : $\theta_{\min} \approx \frac{\lambda}{D}$
- Problème de l'astronomie radio : faible résolution angulaire (due à la diffraction)
- Solution : combiner les signaux de plusieurs télescopes : c'est l'interférométrie radio !
- D , plutôt que le diamètre du télescope, devient la distance entre les différents télescopes



Perspectives modernes – Interférométrie radio



VLA, Mexique, 27 antennes



ALMA, Chili, 66 antennes

Perspectives modernes – Photographie d'un trou noir



- Interférométrie radio à une échelle planétaire !

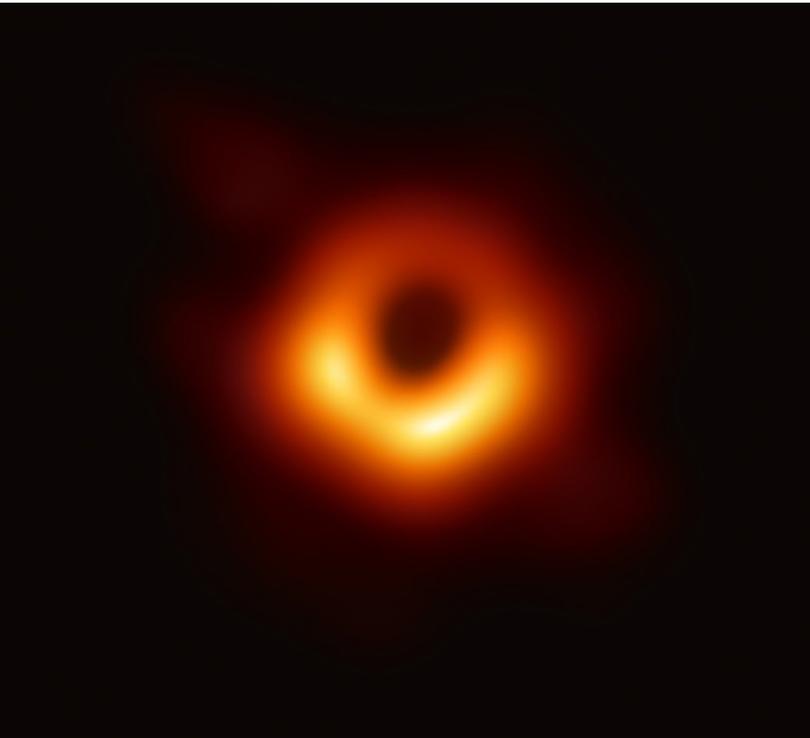
- Résolution angulaire requise : discerner une pièce sur la Lune depuis la Terre

- Requiert de bonnes conditions météo sur chaque site

- Seuls deux trous noirs sont assez proches et grands pour être résolus : M87* et Sgr A*



Perspectives modernes – Photographie d'un trou noir



- Ombre du trou noir au centre
- Prédit un trou noir d'une masse de quelques milliards de masses solaires au cœur de la galaxie M87 !
- Difficile de faire mieux avec des télescopes terrestres, missions spatiales possibles ?
Télescope radio sur la Lune ?

Conclusion

Des réponses

- La quête des trous noirs s'est faite main dans la main avec les techniques d'astronomie les plus poussées
- Ce modèle décrit toutes les observations avec un succès éclatant

Des questions

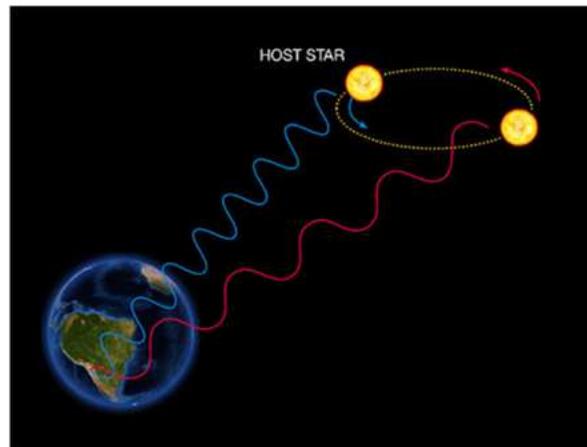
- Trous noirs de masse intermédiaire ? Primordiaux ?
- Comment se sont formés les trous noirs supermassifs ?
- Comment décrire la singularité au centre d'un trou noir ?
- Comment se forment les jets d'AGN ?

Merci pour votre attention !

Bonus : Effet Doppler

La fréquence d'un signal périodique émis par un objet en mouvement se rapprochant de nous augmente, elle diminue s'il s'éloigne de nous !

$$\frac{\lambda_{\text{mesure}} - \lambda_{\text{émission}}}{\lambda_{\text{émission}}} = \frac{v_{\parallel \text{objet}}}{c}$$



Méthode des « vitesses radiales » mentionnée précédemment : *blueshift* et *redshift* des raies d'émission

