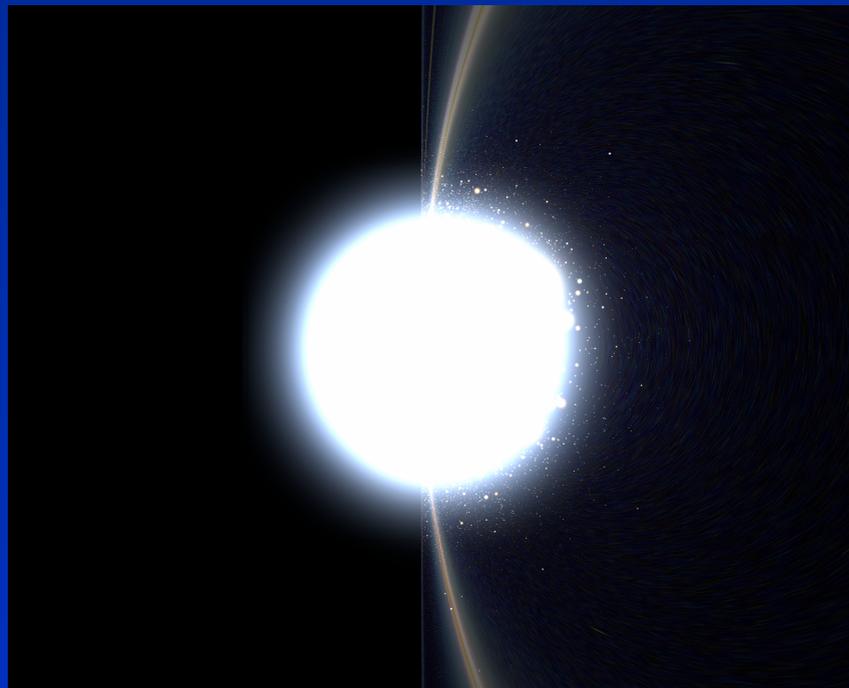


# Voyage autour (et à l'intérieur) d'un trou noir

Alain Riazuelo

Institut d'astrophysique de Paris

Montgeron, 3 juin 2017



# Plan

- Qu'est-ce qu'un trou noir ?
- Comment se forment les trous noirs
- À quoi ressemblent les trous noirs

# Qu'est-ce qu'un trou noir ? (I)



- Pour échapper à l'attraction terrestre, une fusée doit atteindre une **vitesse minimale** avant de couper ses moteurs, appelée **vitesse de libération**

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}}$$

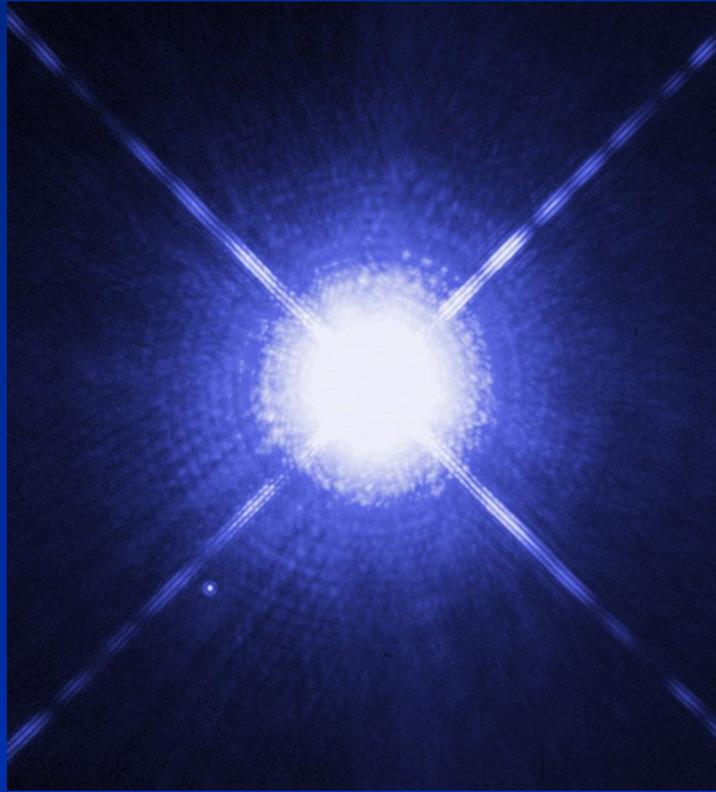
- Cette vitesse de libération est de 40 000 km/h, c'est-à-dire environ **11,2 km/s**
- Cette vitesse est déterminée par la **masse** et le **rayon** de la Terre.
- Elle est (difficilement) atteignable par des engins macroscopiques (fusées) et (plus facilement) par des objets microscopiques.

# Qu'est-ce qu'un trou noir ? (II)



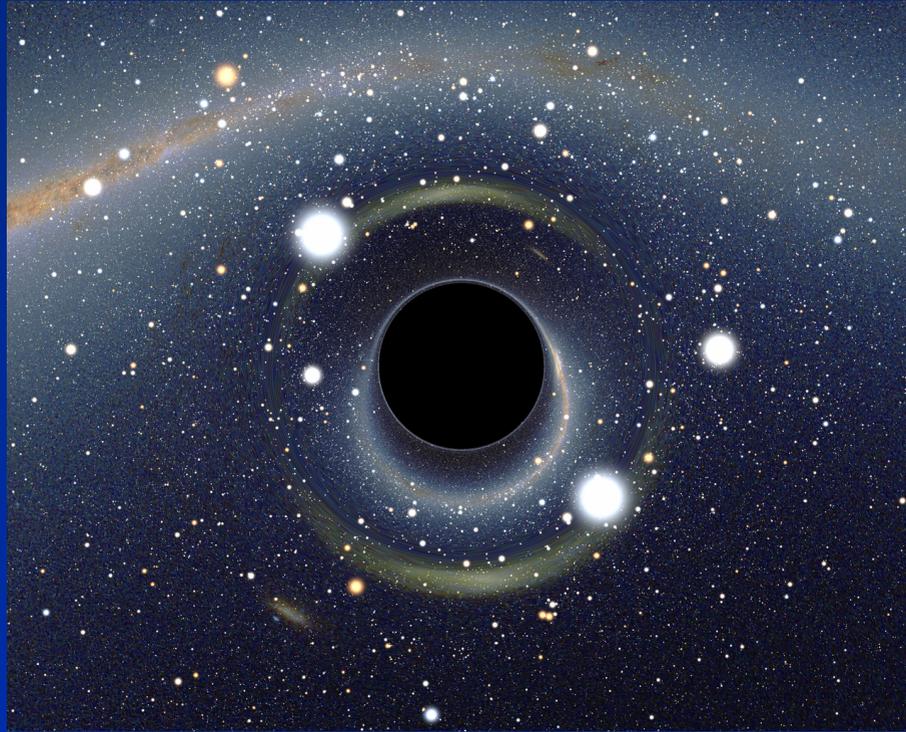
- Pour un astre quelconque, plus la **masse est élevée** et plus le **rayon est petit**, plus la **vitesse de libération est élevée**
- Exemples
  - Terre :  $v_{\text{Sol}}^{\text{lib}} \sim 11,2 \text{ km/s}$
  - Soleil :  $R_{\text{Sol}} \sim 100 R_{\text{Terre}}$ ,  $M_{\text{Sol}} \sim 300\,000 M_{\text{Terre}}$ ,  $v_{\text{Sol}}^{\text{lib}} \sim 600 \text{ km/s}$
- Laplace, Mitchel (fin XVIII<sup>e</sup>) : que se passe-t-il si un astre est suffisamment compact pour retenir la lumière, qui se déplace à 300 000 km/s ?
- Question **académique** à l'époque : le Soleil est 200 000 fois trop gros pour retenir la lumière étant donnée sa masse. Un objet possédant la densité de la Terre devrait avoir un rayon de 170 000 000 de km pour être un trou noir... et aurait une masse 57 millions de fois plus grande que le Soleil.

## Mais...



- On va peu à peu découvrir des astres de plus en plus compacts, donc dotés d'une **vitesse de libération de plus en plus élevée**
- Exemples
  - Sirius B, naine blanche :  $M_{\text{Sir B}} \sim M_{\text{Sol}}$ ,  $R_{\text{Sir B}} \sim R_{\text{Terre}}$ , densité  $\sim 1 \text{ t/cm}^3$ ,  $v_{\text{Sir B}}^{\text{lib}} \sim 6000 \text{ km/s}$
  - Pulsar du Crabe, étoile à neutrons :  $M_{\text{Crabe}} \sim 1,4 M_{\text{Sol}}$ ,  $R_{\text{Crabe}} \sim 10 \text{ km}$ , densité  $\sim 7 \times 10^8 \text{ t/cm}^3$ , ou 70 000 Tours Eiffel/cm<sup>3</sup>,  $v_{\text{Crabe}}^{\text{lib}} \sim 200\,000 \text{ km/s}$

# Qu'est-ce qu'un trou noir ? (III)



- ... Il est tentant d'imaginer des astres dont la vitesse de libération soit supérieure à la vitesse de la lumière !

$$R \leq \frac{2GM}{c^2}$$

- Par ailleurs, Einstein a démontré en 1905 qu'on ne pouvait dépasser la vitesse de la lumière, soit 300 000 km/s...
- Si des tels astres existent, rien ne peut s'en échapper. Ce sont des **trous noirs**
- On sait aujourd'hui que de tels objets existent dans la Nature
- ... Mais la genèse de la compréhension de tout ceci a occupé (épisodiquement) astronomes, physiciens, mathématiciens et astrophysiciens pendant près de 1000 ans...

# Du concept à la réalité physique

- Le **concept** de trou noir remonte à la fin du XVIII<sup>e</sup> siècle (Laplace et Mitchell), **MAIS...**
- Pour une **compréhension fine** des détails de la formation des trous noirs, il **a fallu** :
  - ♣ Comprendre que les **étoiles sont des objets semblables au Soleil** (1838-1872)
  - ♣ Comprendre la **structure interne** d'une étoile (~1920)
  - ♣ Déterminer quelle est leur **source d'énergie** (1938)
  - ♣ Comprendre que les étoiles **évoluent très différemment** en fonction de leur **masse** (~1960)...
  - ♣ ... et en déduire que certaines étoiles pouvaient donner naissance à un trou noir
  - ♣ **Confronter** ce scénario avec des **observations** (1054-1972)

# Quels trous noirs dans l'Univers ? (I)

- Il existe (au moins) **deux types** de trous noirs
  - ♣ Les **trous noirs stellaires**, issus de l'évolution des étoiles massives. Leur mode de formation est (plutôt) bien compris
    - Nombre : quelques dizaines de millions par galaxie comme la nôtre (qui comportent des centaines de milliards d'étoiles).
    - Masse : de 3 à quelques dizaines de fois la masse du Soleil
  - ♣ Les **trous noirs supermassifs** situés au centre de (toutes ?) les galaxies massives. Leur mode de formation est moins bien connu.
    - Nombre : un (à deux) par galaxie
    - Masse : de plusieurs centaines de milliers à plusieurs milliards de masses solaires

Les trous noirs supermassifs sont **beaucoup plus rares** mais **beaucoup plus faciles à mettre en évidence** que les trous noirs stellaires.

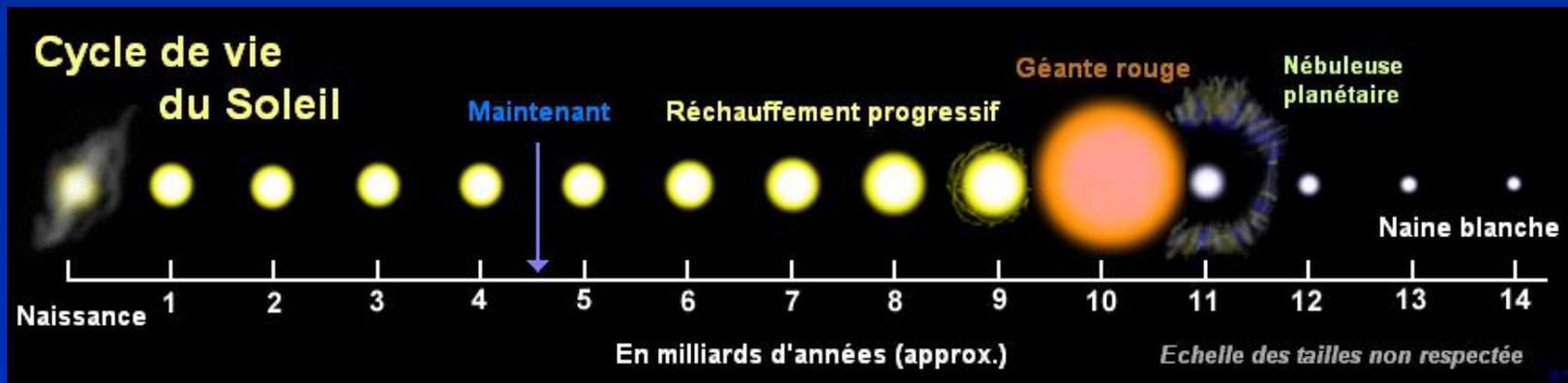
# Quels trous noirs dans l'Univers ? (II)

- Il existe **peut-être deux autres types** de trous noirs
  - ♣ Les trous noirs dits “**intermédiaires**”
    - Nombre : ?
    - Masse : de quelques centaines à quelques dizaines de milliers de masses solaires (?)
    - Mode de formation : ?
  - ♣ Des trous noirs beaucoup plus petits formés lors du Big Bang (**trous noirs primordiaux**)
    - $\mu_{\text{form}} \propto 1/M^2$  donc petite masse  $\rightarrow$  origine primordiale
    - Nombre : ?, mais pas trop sinon on les aurait détectés
    - Masse : ?, mais a priori beaucoup plus petite qu'une masse solaire jusqu'à  $10^{-12}$  masse terrestre (limite de Hawking)

# Les étoiles

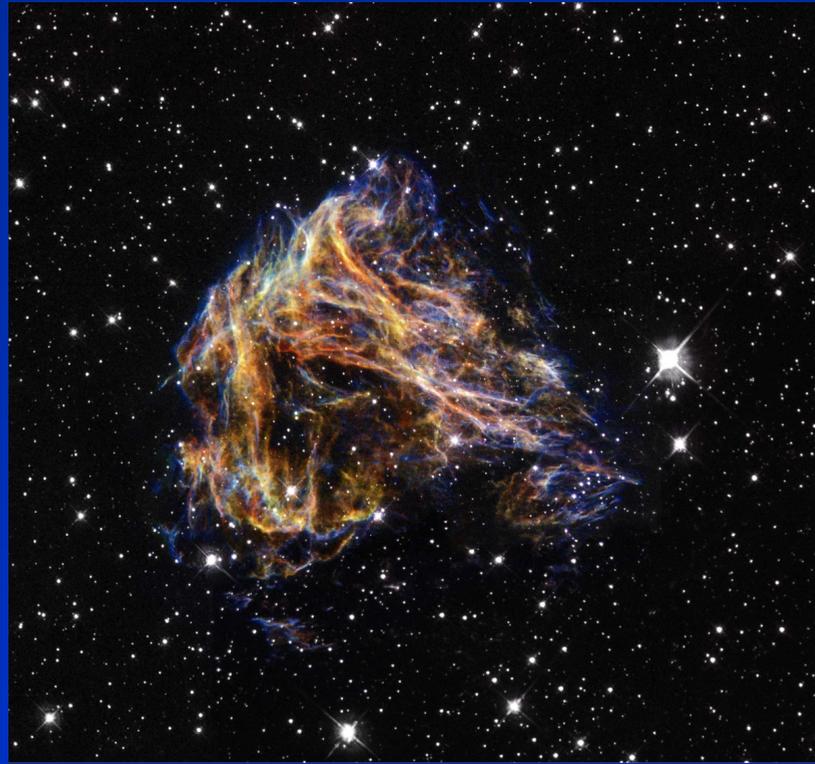
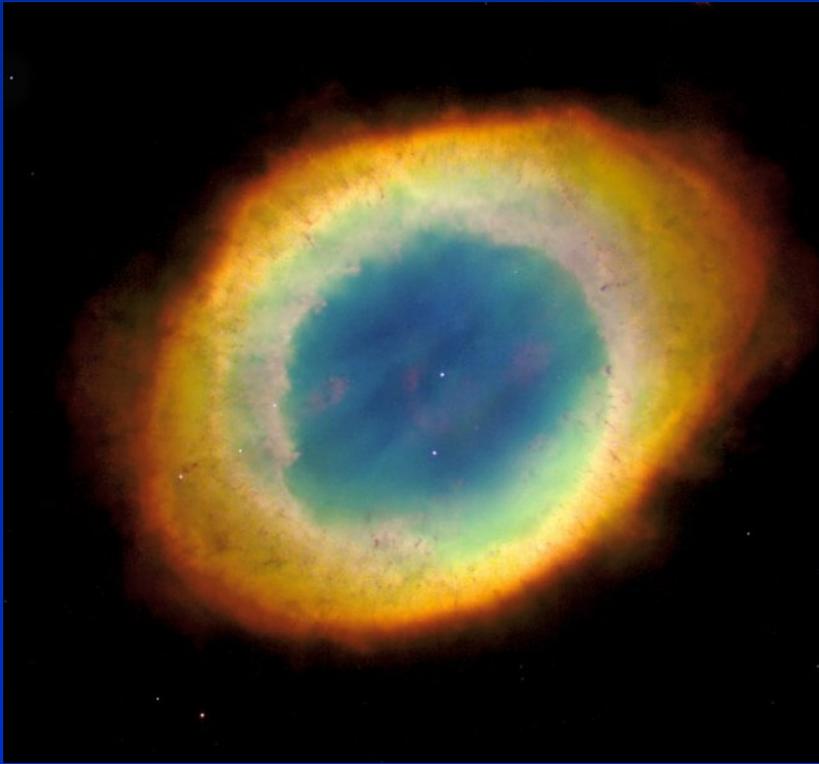
♣ Une étoile, c'est :

- Un nuage de gaz suffisamment massif qui se contracte,
- se fragmente (s'il est trop gros)
- s'échauffe
- s'allume (réactions nucléaires)
- se stabilise
- se réorganise de temps en temps (changement du type de réaction nucléaire)
- **s'éteint** plus ou moins violemment en laissant un **résidu compact**



# La fin d'une étoile

- ♣ Elle dépend de sa masse
- ♣ Les étoiles de faible masse dissipent doucement une grande partie de leur masse dans le milieu interstellaire → **Nébuleuse planétaire** + **Naine blanche** (g.)
- ♣ Les étoiles plus massives explosent en fin de vie → **Supernova** → **Rémanent de supernova** + **Étoile à neutrons** ou **Trou noir** (d.)



# Pourquoi un “effondrement” gravitationnel ?

- ♣ On part de l'équation d'équilibre hydrostatique,

$$\nabla P = \mu \mathbf{g} = -\mu \nabla \Phi$$

et de l'équation de Poisson ( $\Delta \Phi = 4\pi G \mu$ ), en supposant une équation d'état “à température nulle” :

$$P = \kappa \mu^{1+\frac{1}{n}}$$

- ♣ Cela donne l'équation de Lane-Emden

$$\frac{\Delta \mu}{\mu} - \left(1 - \frac{1}{n}\right) \left(\frac{\nabla \mu}{\mu}\right)^2 + \frac{4\pi G}{\mu} \frac{dP}{d\mu}$$

- ♣ L'analyse dimensionnelle donne alors la relation masse-rayon :

$$R^{\frac{3-n}{1-n}} \propto M$$

- ♣ À densité modérée, étant donné que l'on a  $p_{\text{Fermi}} \propto \mu^{\frac{1}{3}}$ , la matière froide est non relativiste, ( $p_{\text{Fermi}} \ll mc$ ) et soutenue par la pression de dégénérescence, c'ad  $n = \frac{3}{2}$ , de sorte que  $M \propto R^{-3}$
- ♣ Plus la masse est grande, plus le rayon est petit, et plus la pression centrale est élevée, mais comme  $p_{\text{Fermi}} \propto \mu^{\frac{1}{3}}$ , l'impulsion moyenne des électrons dépasse  $mc$ , et ils deviennent relativistes.
- ♣ Mais dans ce cas,  $n = 3$  et la relation masse-rayon devient pathologique, avec  $M \propto R^0$  !
- ♣ Cela signifie qu'il n'existe qu'une seule valeur de la masse pour laquelle il existe une configuration d'équilibre stable. Au-delà de cette masse, il n'y a pas de configuration stable et la matière s'effondre.

# Les supernovae (I)

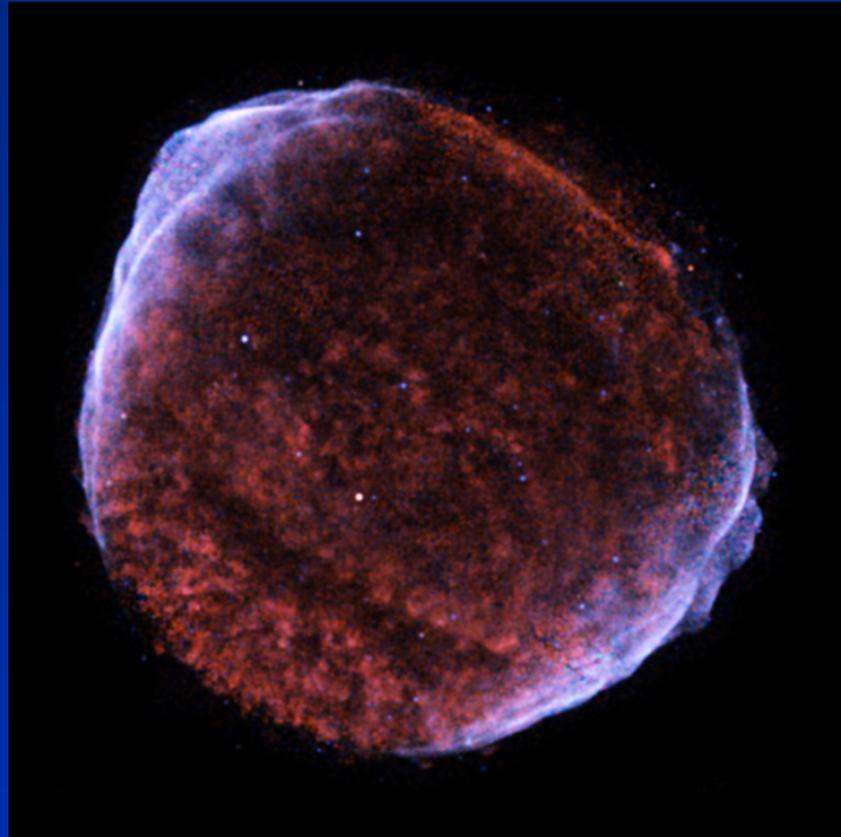
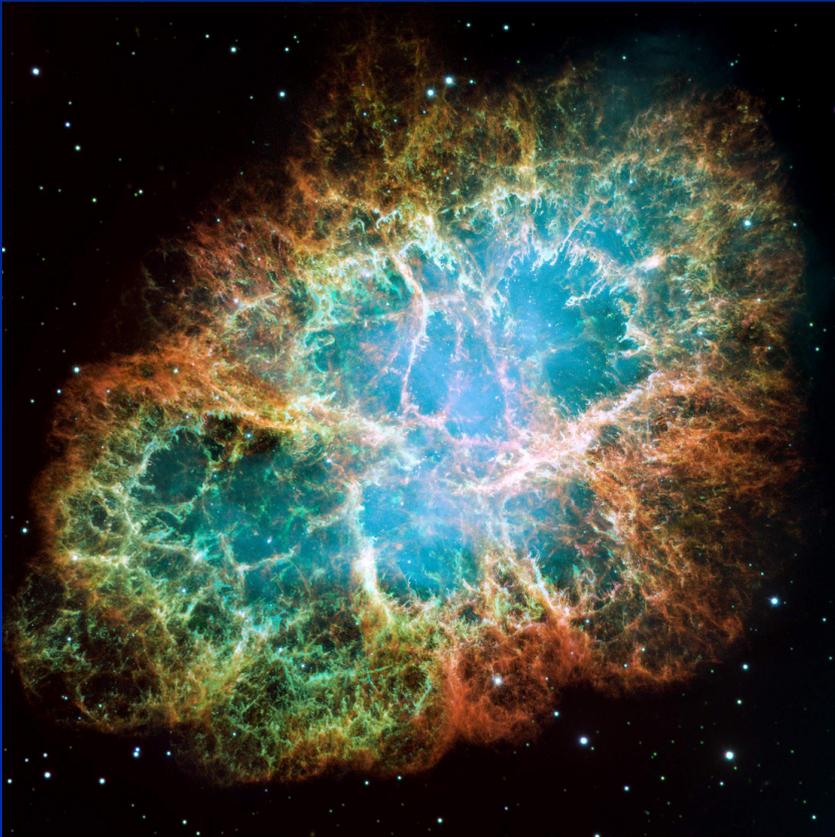


SN 1987A, juste avant (g.) et juste après (dr.) l'explosion

♣ Ce type de supernova correspond à :

- L'implosion du cœur de l'étoile du fait de l'arrêt des réactions nucléaires
- La dislocation des couches extérieures suite à l'onde de choc qui en résulte → **Supernova à effondrement de cœur**
- Phénomène complexe et mal modélisé aujourd'hui encore – Voir cours de Thierry Foglizzo

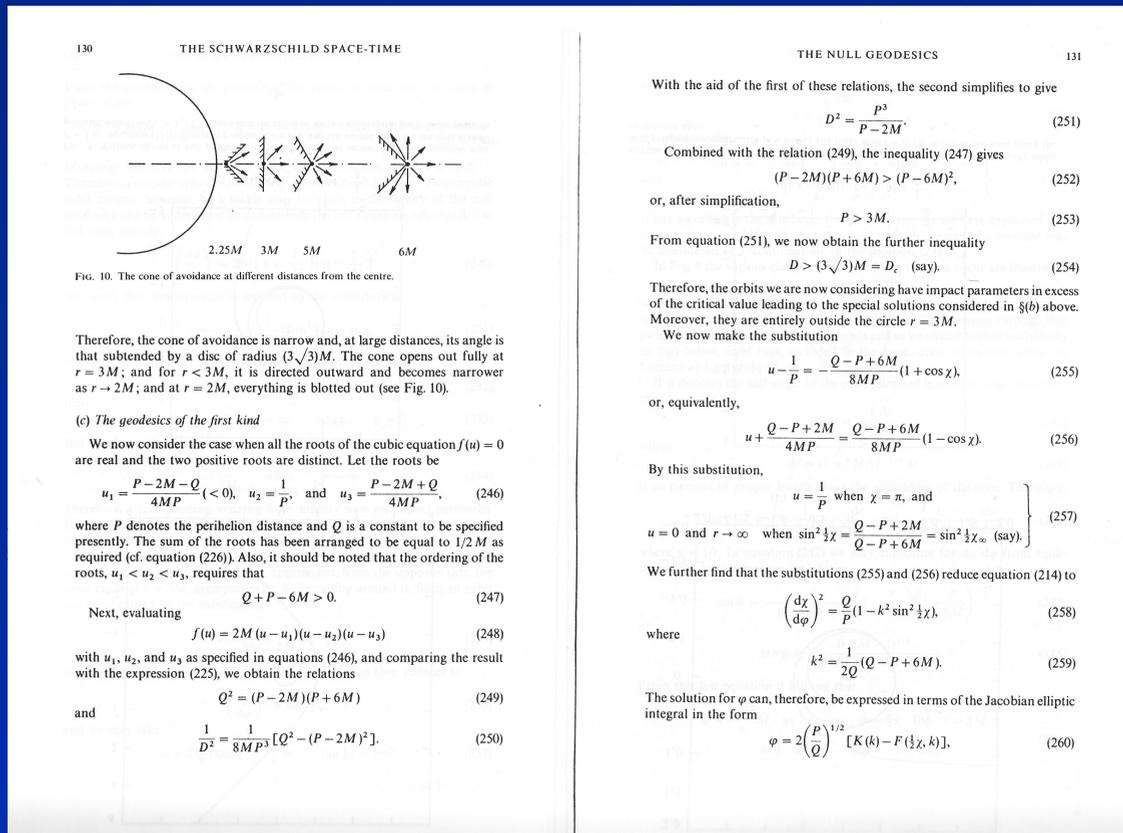
# Les supernovae (II)



Quelques rémanents de supernova célèbres (g. : SN 1054 ; dr. : SN 1006)

- ♣ La supernova laisse derrière elle :
  - Un rémanent de supernova, qui se dissipe dans le milieu interstellaire en quelques centaines de milliers d'années .
  - Un résidu compact (étoile à neutrons ou trou noir) quand elle est à effondrement de cœur
  - Un souvenir durable aux chanceux qui l'ont observée (en 185, 386, 393, 1006, 1054, 1181, 1572, 1604, 2017...)
- ♣ Mais on n'a jamais identifié **sans équivoque** une supernova ayant donné naissance à un trou noir

# À quoi ressemble un trou noir ?



S. Chandresakhar, *The mathematical theory of black holes* (1983), 646 pages

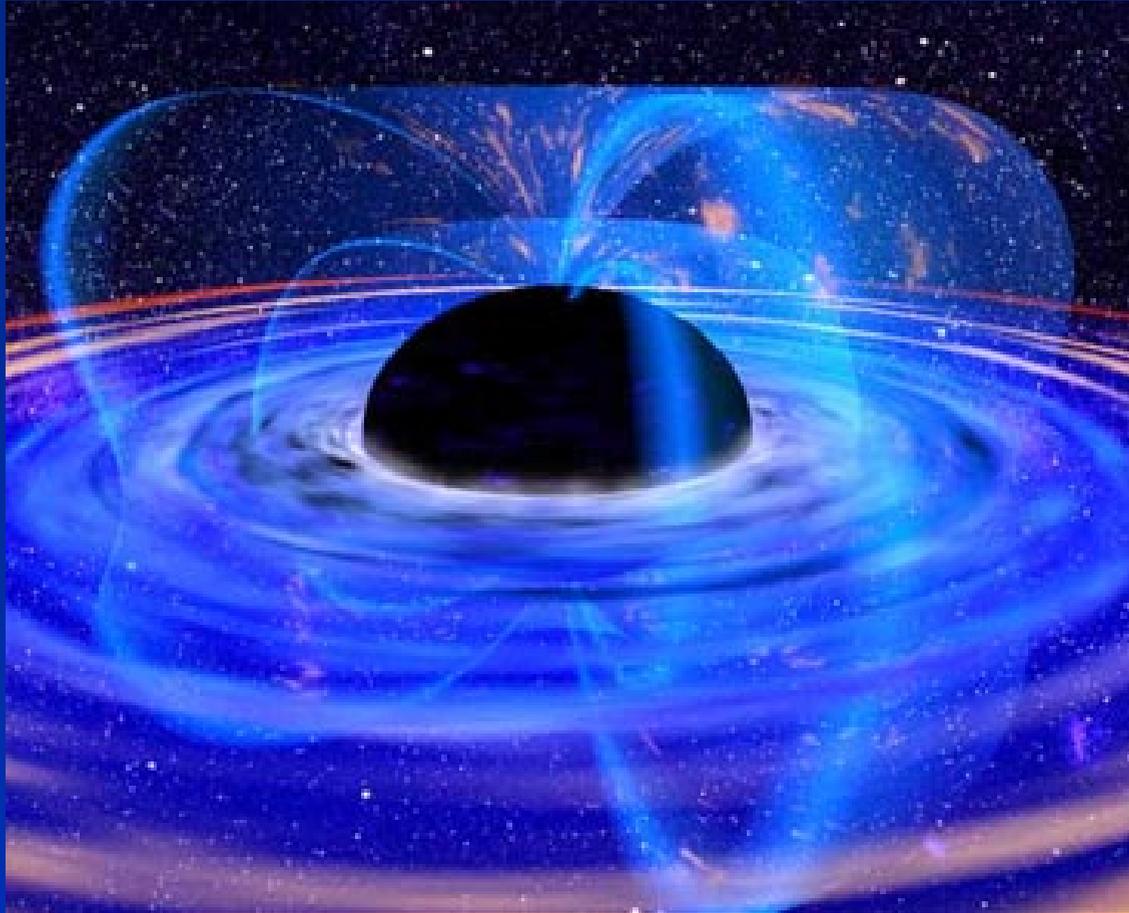
♣ Peu de travaux de visualisation...

- J.-P. Luminet (1979)
- J.-A. Marck (1996)

♣ ... y compris en relativité restreinte

- C. M. Savage & A. C. Searle, *Seeing Relativity*, <http://www.anu.edu.au/Physics/Searle/> + DVD

# À quoi ne ressemble *pas* un trou noir ?



Vue d'artiste NASA

♣ Erreurs au niveau de :

- Disque de matière (disque d'accrétion)
- Silhouette du trou noir
- Déflections de la lumière

# À quoi ressemblera un trou noir ? (I)

- Un trou noir est petit : de quelques kilomètres à quelques milliards de kilomètres

$$R_{\text{TN}} = \frac{2GM}{c^2} \sim \frac{M}{M_{\text{Soleil}}} \times 3 \text{ km}$$

- Un trou noir est loin car le cosmos est vaste, les trous noirs sont des astres peu communs et de surcroît difficiles à mettre en évidence :

- Les étoiles proches sont à quelques années-lumière de nous (1 al = 10 000 000 000 000 de km)
- Les trous noirs sont significativement plus rares que les étoiles (1 / 10 000 ?)
- Seule une infime partie des trous noirs de notre Galaxies sont mis en évidence (1 / 1 000 000 ?) → une vingtaine en tout

- Exemples :

- Cyg X-1 :  $M \sim 10 M_{\text{Soleil}}$ ,  $D \sim 5\,600 \text{ al}$ ,  $\theta \sim 0.6 \text{ nas}$   
Note : 1 nas = détail de 1  $\mu\text{m}$  vu à la distance Terre-Lune
- Sgr A\* :  $M \sim 4.1 \times 10^6 M_{\text{Soleil}}$ ,  $D \sim 26\,000 \text{ al}$ ,  $\theta \sim 50 \mu\text{as}$   
Note : 50  $\mu\text{as}$  = détails de 50 cm vu à la distance Terre-Lune
- M 87 :  $M \sim 3.3 \times 10^9 M_{\text{Soleil}}$ ,  $D \sim 53\,000\,000 \text{ al}$ ,  $\theta \sim 20 \mu\text{as}$

- Très, très difficiles à observer car très, très, très petits, mais espoirs raisonnables à l'échelle d'une décennie ou deux

# À quoi ressemblera un trou noir ? (II)

- ♣ Problème : finesse des détails limitée par le **diamètre  $D$**  d'un télescope et la **longueur d'onde  $\lambda$**  d'observation

$$\text{Resolution} = \frac{\lambda}{D}$$

- ♣ Télescope spatial de 100 m de diamètre observant dans le visible

$$\text{Resolution} = 1 \text{ mas}$$

- ♣ **Mais...** Limitation due à l'atmosphère = 0,1 – 1 as



Un cliché de Hubble est au mieux **1000 fois trop grossier** pour observer le trou noir le plus facile à imager...

# À quoi ressemblera un trou noir ? (III)

- ♣ Solution : l'**interférométrie** combine (astucieusement) la lumière de plusieurs télescopes séparés les uns des autres d'une **distance  $L$**

$$\text{Resolution} = \frac{\lambda}{L}$$

- ♣ Quasi impossible à mettre en œuvre dans le visible (sauf à courte distance,  $L \sim 100$  m), mais utilisé de longue date dans le domaine des **ondes radio**
- ♣ Perte en résolution d'un facteur **2 000** car la longueur d'onde est beaucoup plus grande ( $0,5 \mu\text{m} \rightarrow 1 \text{mm}$ ), MAIS gain d'un facteur **100 000** car la distance entre les radiotélescopes peut atteindre le diamètre terrestre ( $100 \text{m} \rightarrow 10\,000 \text{km}$ )

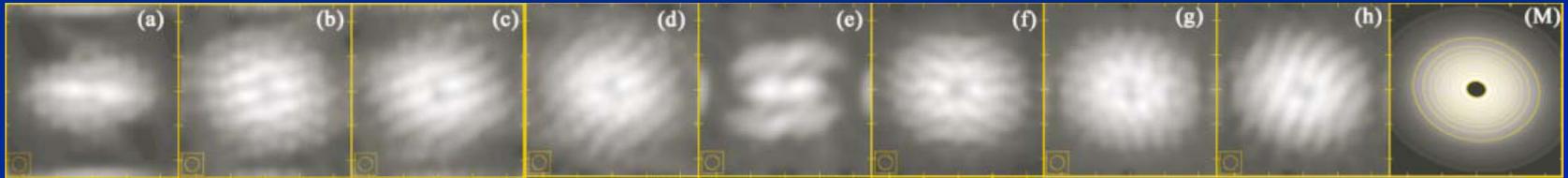


Le projet d'interféromètre ALMA

# À quoi ressemblera un trou noir ? (IV)

♣ Divers projets :

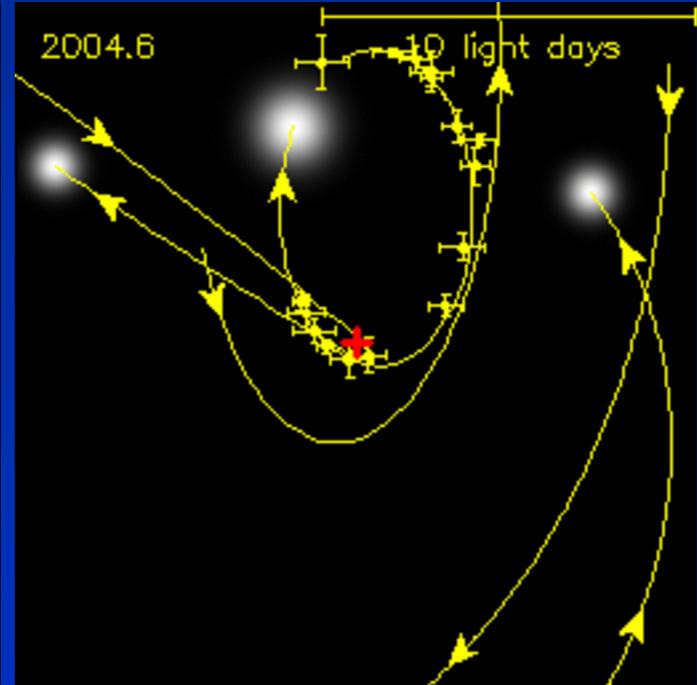
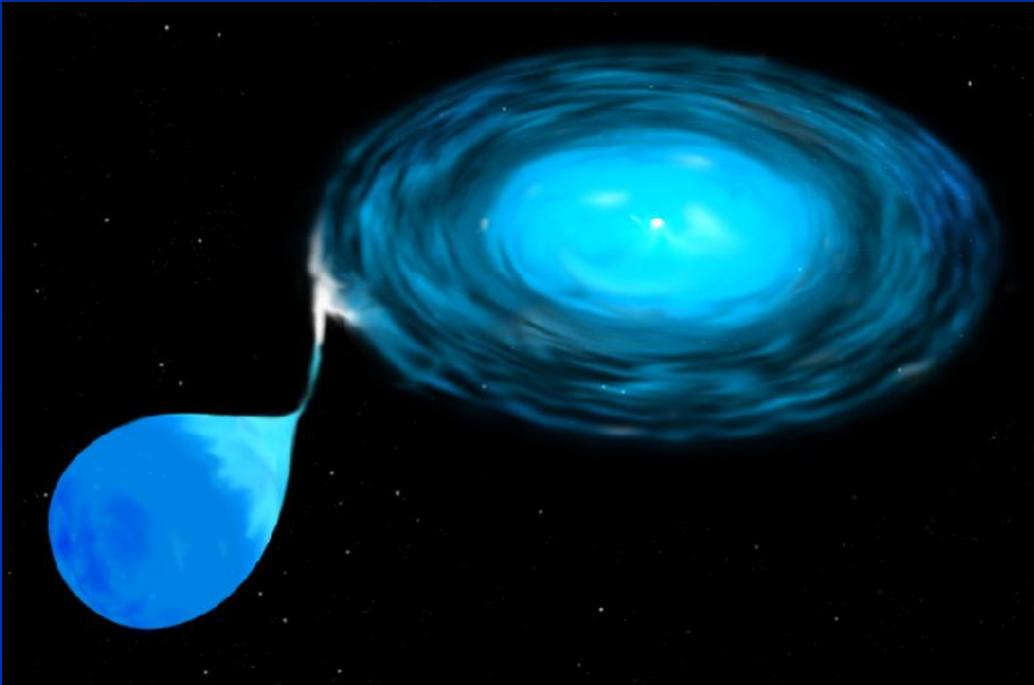
- Interférométrie radio (VLBI) :  $\lambda \sim 3 \text{ mm}$ ,  $L \sim 10^4 \text{ km}$ ,  $\theta \sim 100 \rightarrow 30 \mu\text{as}$



- GRAVITY : astrométrie proche IR au Very Large Telescope (possible mise en service en 2013-2015),  $\theta \sim 10 - 15 \mu\text{as}$
- MAXIM (*Micro-Arcsecond X-Ray Imaging Mission*) : interférométrie X (projet NASA "Beyond Einstein"),  $\theta \sim 1 \mu\text{as}$   
"But no studies exist as to the feasibility and technology requirements to realize an orbiting X-ray interferometer. This is because the technology challenges are severe and this program maybe at least 25-50 years in the future."

# En attendant... (I)

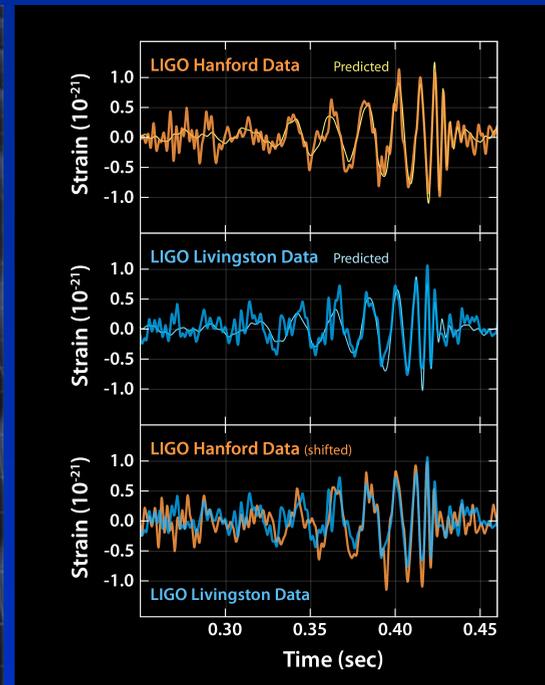
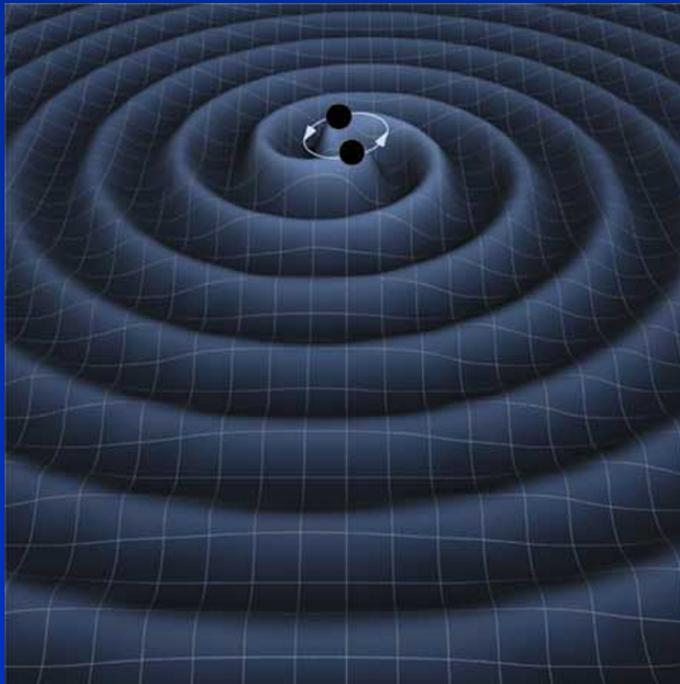
- ♣ Longtemps, il n'a existé que des preuves **indirectes** quoique **scientifiquement indiscutables** de l'existence des trous noirs :
- Un trou noir se révèle par les **propriétés de la lumière** émise par la **matière** qu'il est en train d'**engloutir** (g.)...
- ... ou par son **influence gravitationnelle** sur les **astres** environnants (dr.)



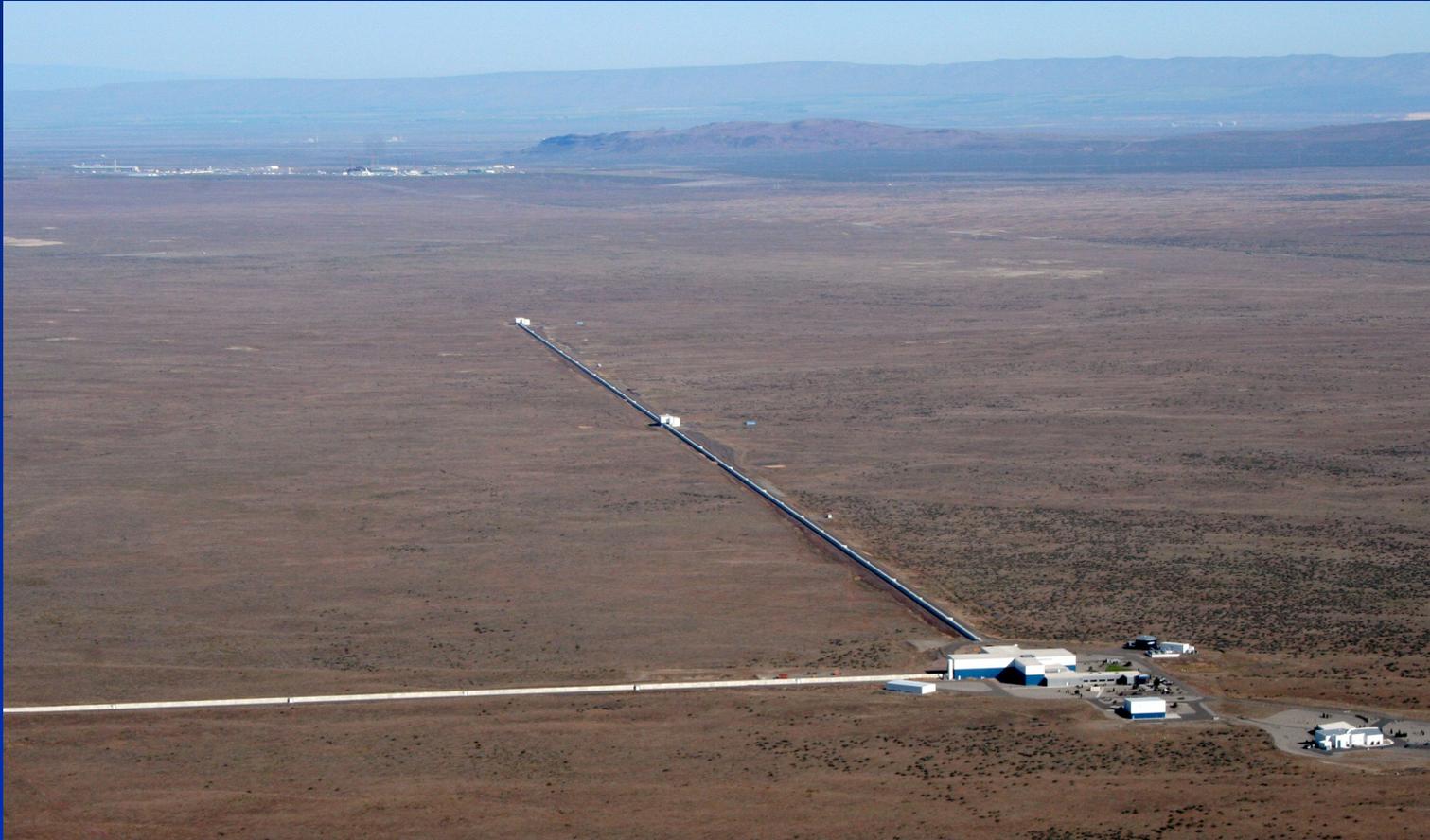
# En attendant... (II)

♣ Et puis, l'an dernier...

- L'espace est, contrairement à ce que l'intuition suggère, un milieu **déformable** (Einstein, 1916)
- La collision de deux trous noirs fait **trembler l'espace** du fait de la fantastique énergie produite par une telle collision
- Ces tremblements de l'espace, les **ondes gravitationnelles**, sont désormais détectables par des instruments au sol (LIGO, aux États-Unis, Virgo, en Europe) puis, plus tard dans l'espace (e-LISA)



# En attendant... (III)



- ♣ Un détecteur d'ondes gravitationnelles est un instrument "passif" et conceptuellement très simple
- ♣ Mais l'intensité du signal (= l'amplitude de la vibration de l'espace) est effroyablement petite, donc difficile à détecter
- ♣ 50 ans de développements technologiques ont été nécessaires pour cela
- ♣ Les événements les plus énergétiques de l'Univers sont aussi les plus indétectables

# En attendant... (IV)

♣ Pourrait-on aller **voir sur place** à quoi cela ressemble ?

- Ce serait **difficile** !

- Un trou noir est (au mieux) à une distance de plusieurs dizaines d'années-lumière (100 000 000 000 000 km ; par comparaison, Voyager 1 et 2 à 10 000 000 000 km)

- On n'a pas la moindre idée de comment détecter des trous noirs proche : seuls quelques dizaines d'entre eux sont connus dans toute notre Galaxie (1/1 000 000)

- Ce serait (potentiellement) **dangereux** !

- Trou noir "actif" (la plupart de ceux que l'on met en évidence) = trou noir en train d'engloutir de la matière → rayonnement effroyablement intense

- Trou noir "petit" (stellaire) → Effets de marée → dislocation instantanée de toute structure qui s'en approche (10 000 000 000 de  $g$  par mètre)

♣ Mais on peut **aisément** (?) **simuler** ce que l'on verrait si on y était !

- C'est ce que l'on va faire

- En essayant d'échapper à certaines des contraintes liées à ces objets, en simulant :

- Un trou noir très proche

- Un trou noir "inactif"

- Un "gros" trou noir

- ...combinaison qui n'est guère réaliste, mais on l'oubliera le temps de la conférence

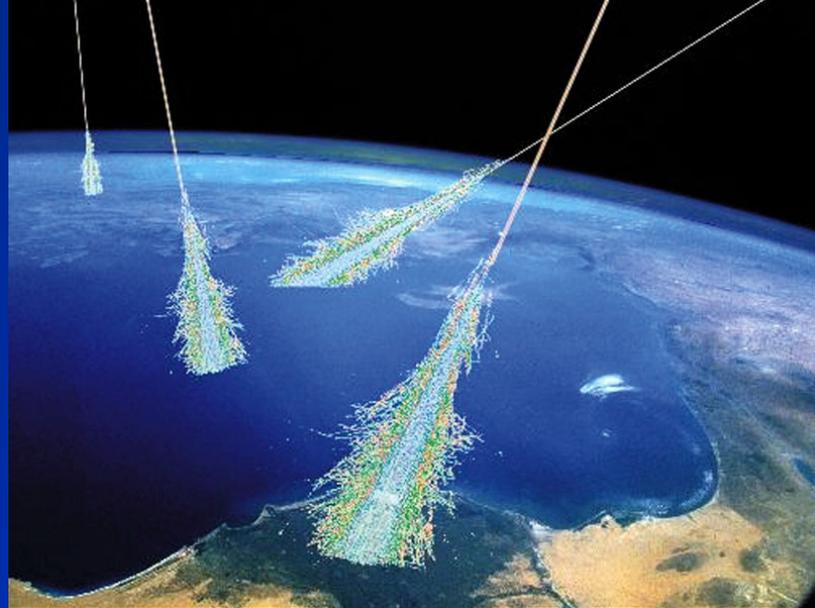
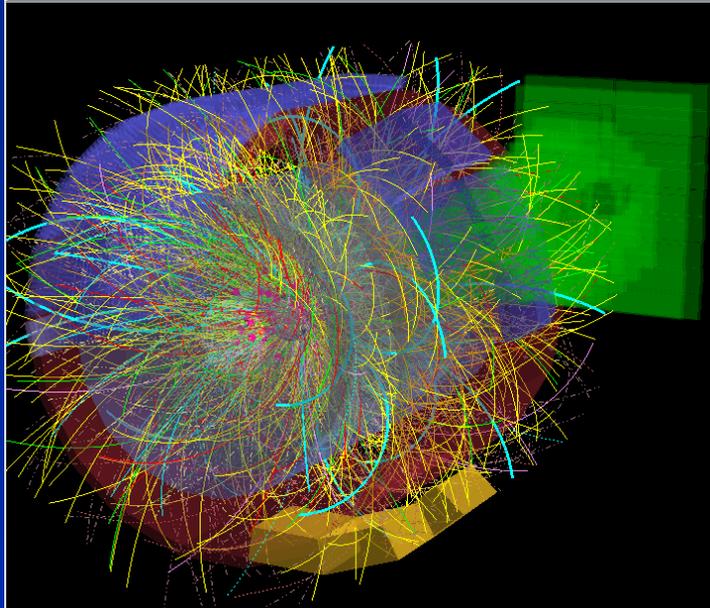
# Que voit-on quand on va vite ?

ou : les films de SF respectent-ils les lois de la physique ?

- ♣ En s'approchant d'un trou noir, on peut être accéléré à des vitesses proches de celle de la lumière
- ♣ → Comment est vue la sphère céleste par un observateur se déplaçant à vitesse relativiste (= proche de la lumière) par rapport à celle-ci ?
- ♣ Plusieurs effets se produisent
  - Aberration
  - Doppler
  - Intensité

# Aberration

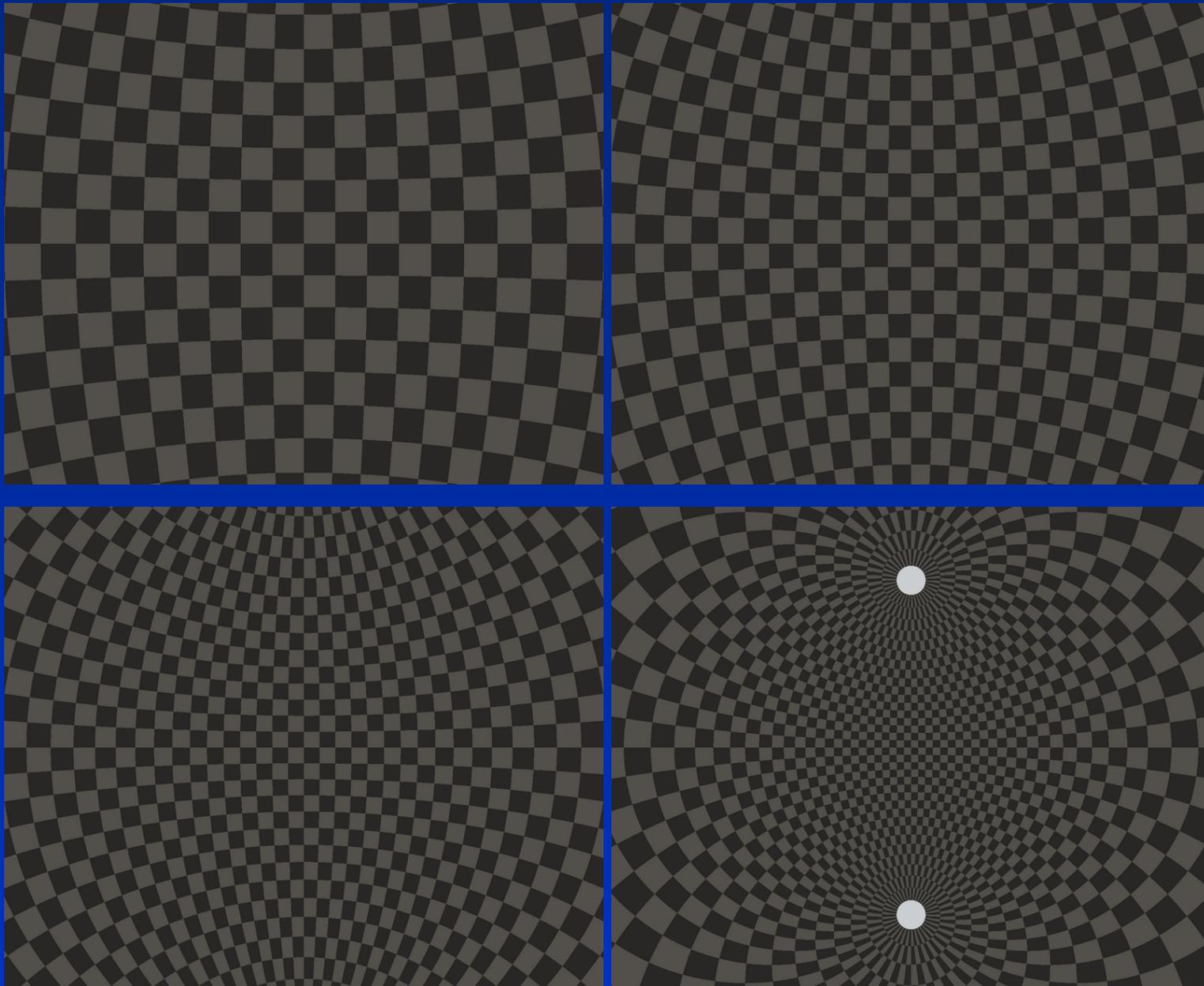
- ♣ Aberration = ce qui fait qu'une collision au LHC est différente d'une collision impliquant des rayons cosmiques...



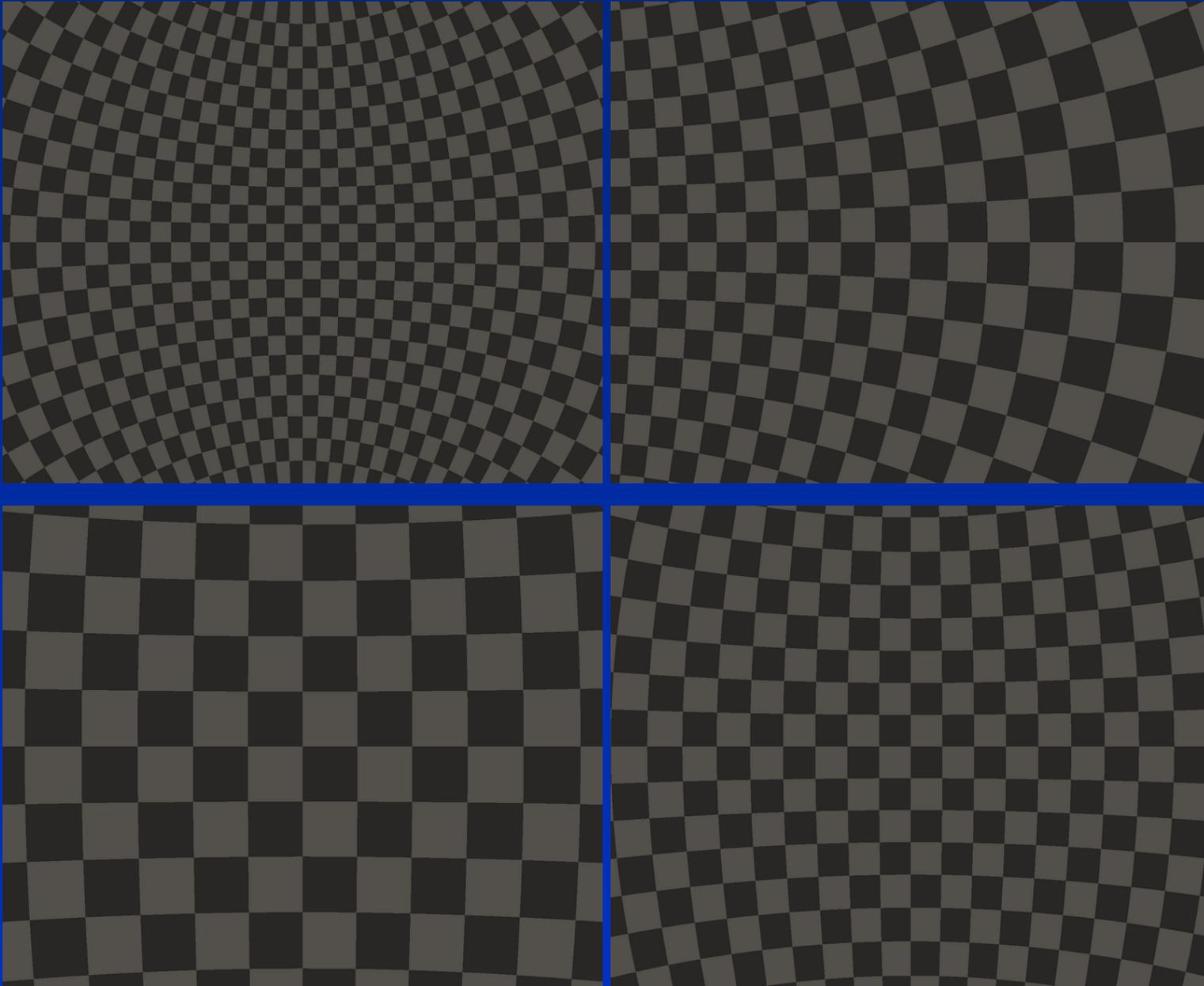
- ♣ Ou, plus concrètement...

- ♣ Aberration = changement de la direction apparente d'un signal quand on se déplace :
  - Direction du vent pour un voilier
  - Pluie sur pare-brise de voiture
  - **Direction apparente de provenance des rayons lumineux** (Bradley, 1728-1748)
  - Effet **contre-intuitif** (opposé à la parallaxe)

Exemples :  $v = 0\%$ ,  $30\%$ ,  $60\%$  et  $90\%$  de la vitesse de la lumière



Exemples :  $v = 50\%$  de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière



# Effet Doppler

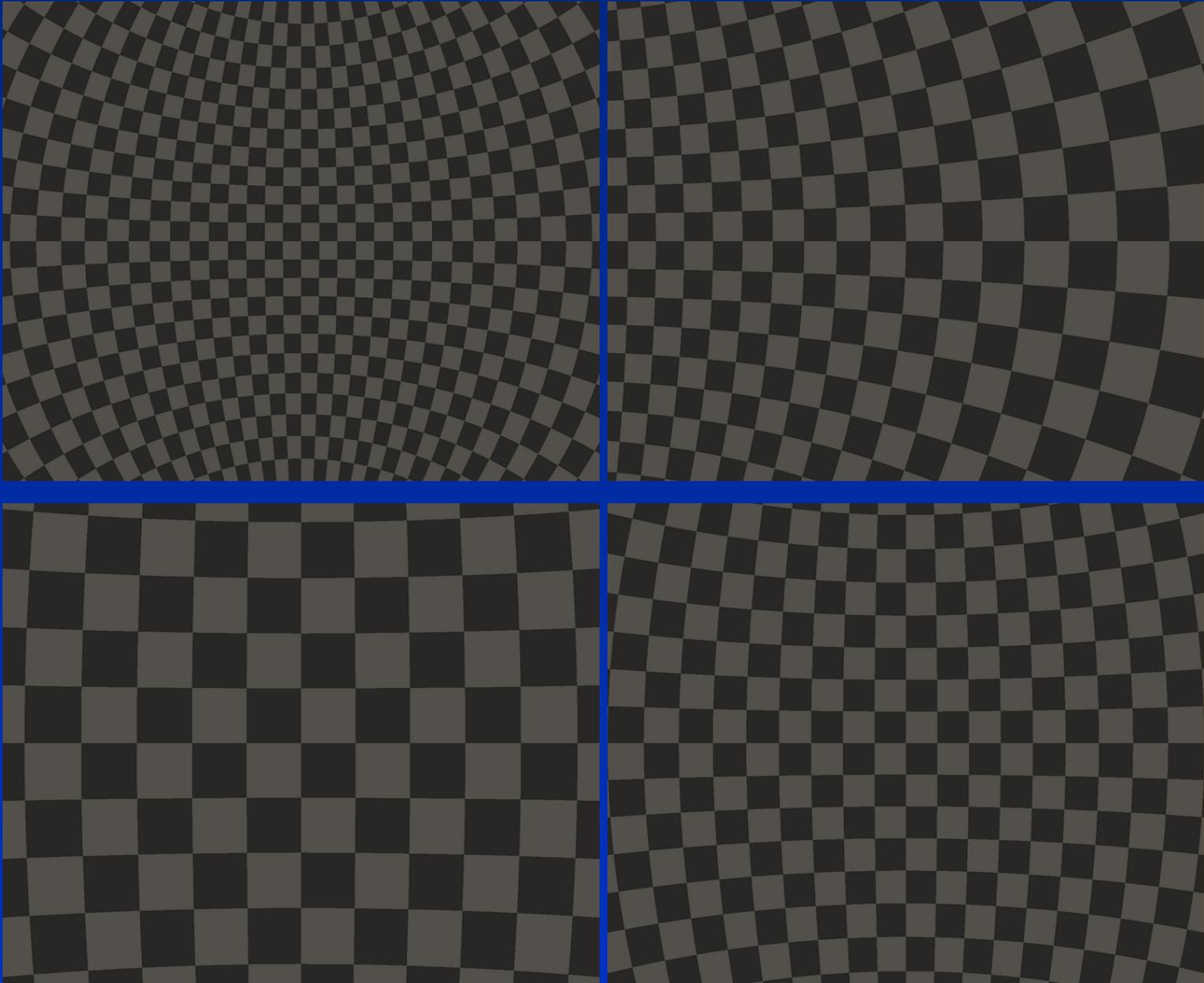
♣ Analogie sonore (sirène d'ambulance) :

- Une source sonore émet un son apparemment plus **aigu** (plus petite longueur d'onde) si elle **s'approche**
- Une source sonore émet un son apparemment plus **grave** (plus grande longueur d'onde) si elle **s'éloigne**

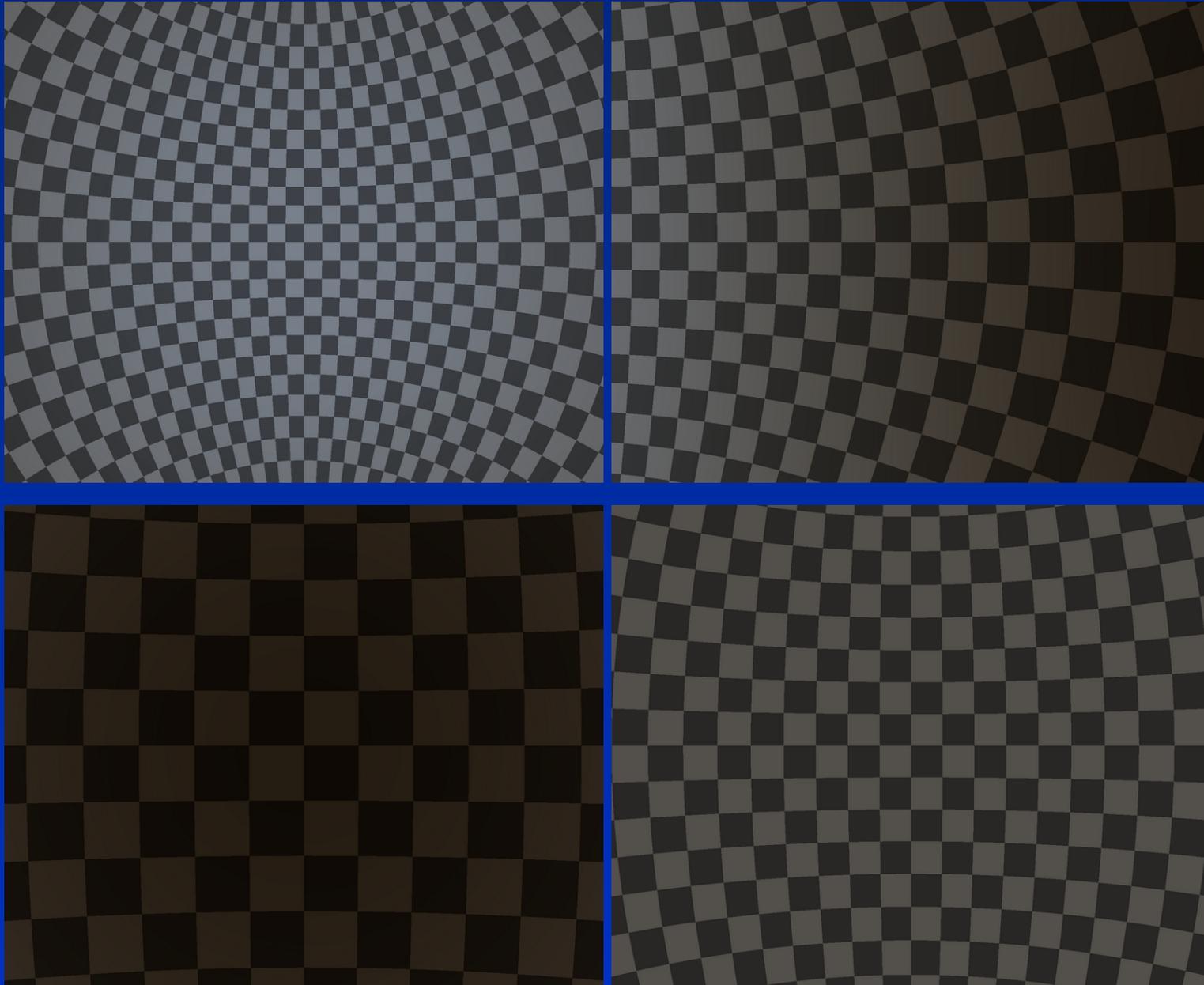
♣ Pour la lumière :

- Une source lumineuse émet une lumière apparemment plus **bleue** si elle **s'approche**
- Une source lumineuse émet une lumière apparemment plus **rouge** si elle **s'éloigne**

Exemples :  $v = 50\%$  de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière sans terme Doppler



Exemples :  $v = 50\%$  de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière avec terme Doppler

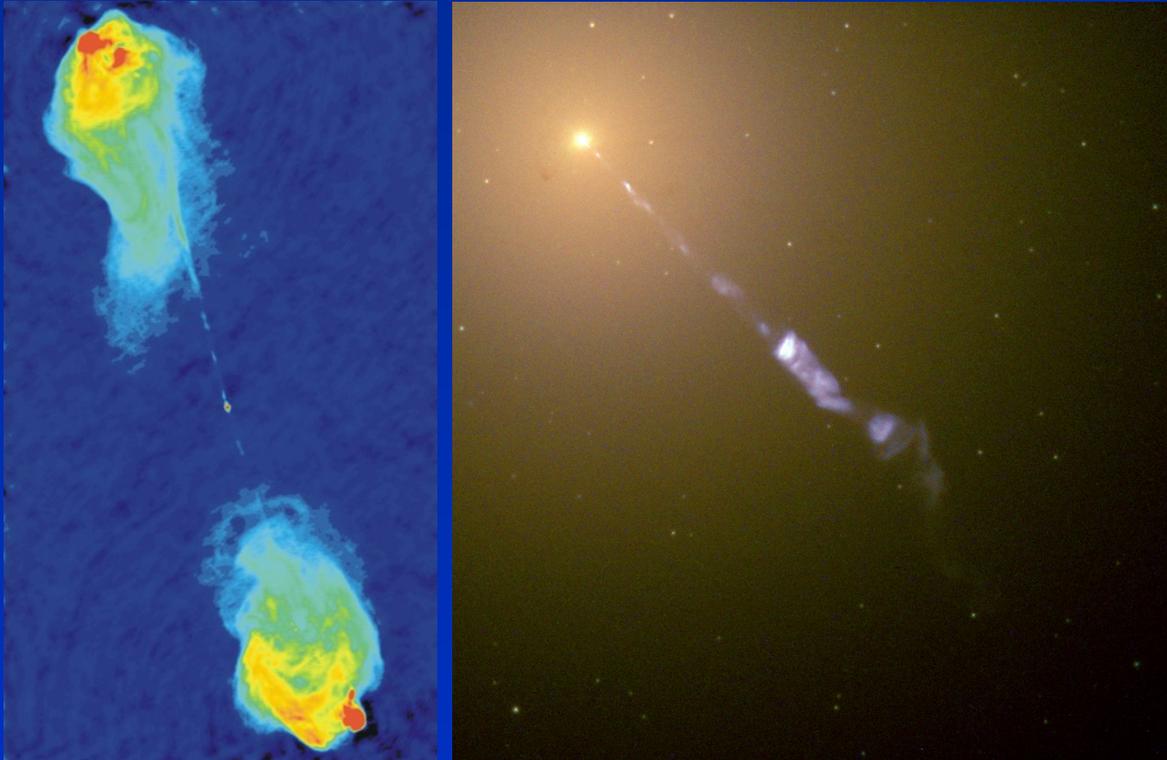


# Intensité

♣ En sus de l'effet Doppler :

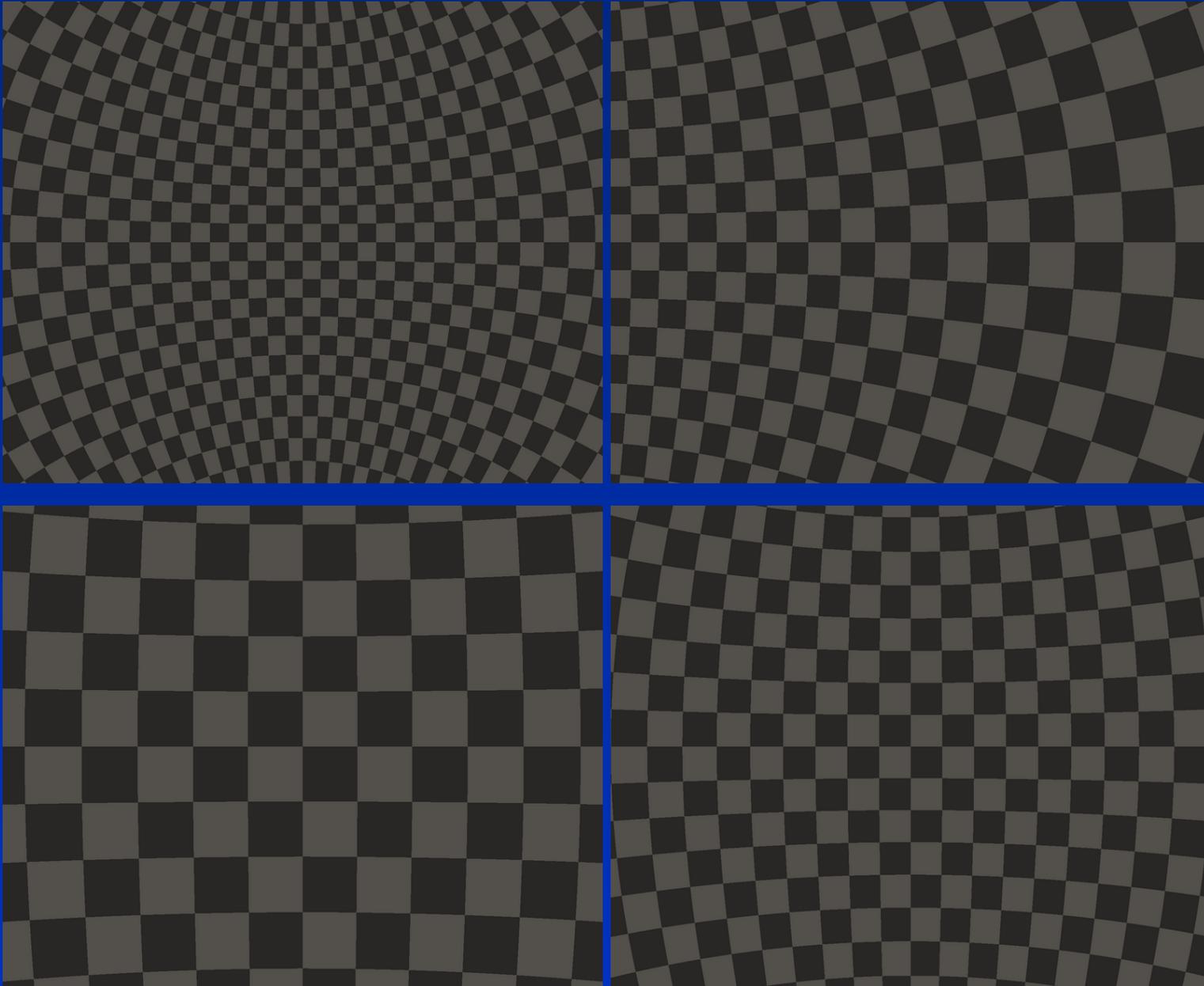
- Une source lumineuse émet une lumière son apparemment **plus lumineuse** si elle **s'approche**
- Une source lumineuse émet une lumière son apparemment **moins lumineuse** si elle **s'éloigne**

♣ Effet très marqué pour les hautes vitesses (cf “double” jet de M87)

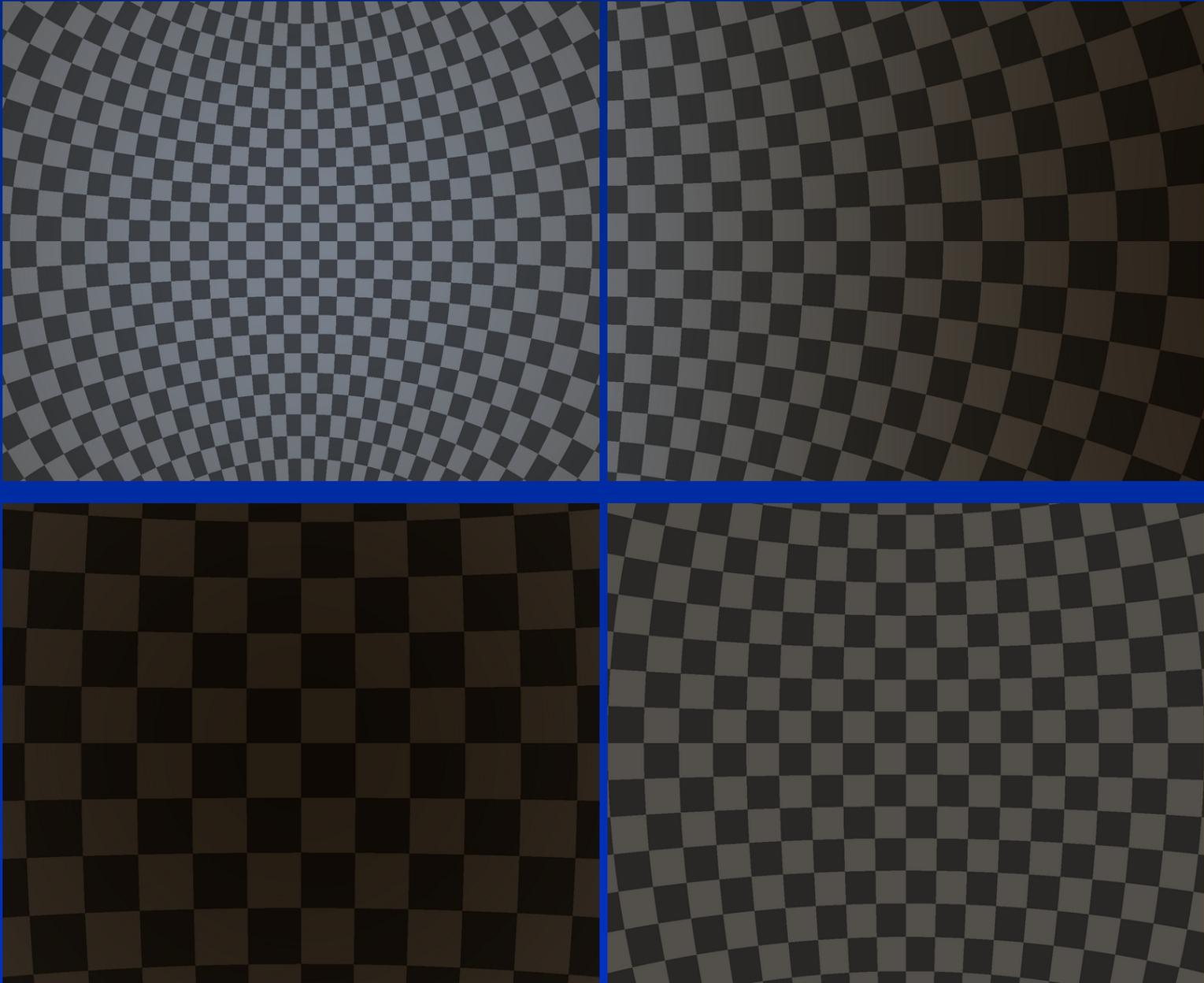


♣ → On atténuera l'effet par la suite

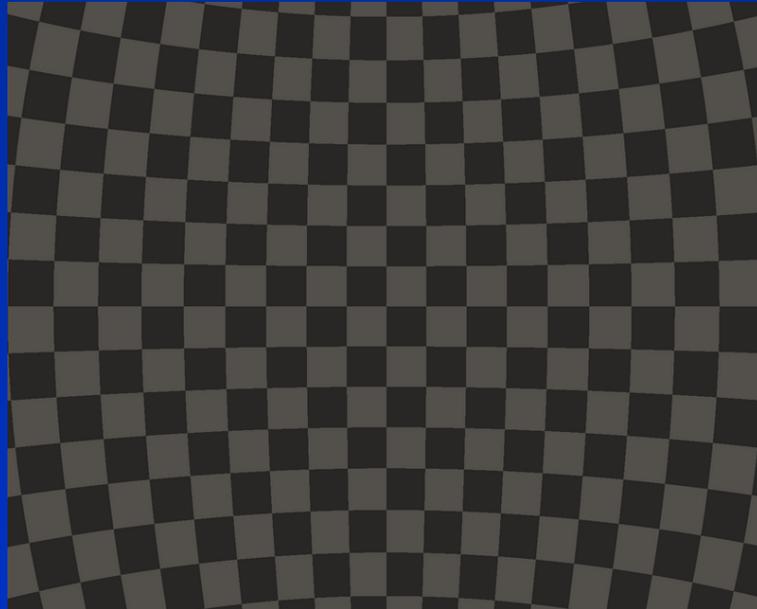
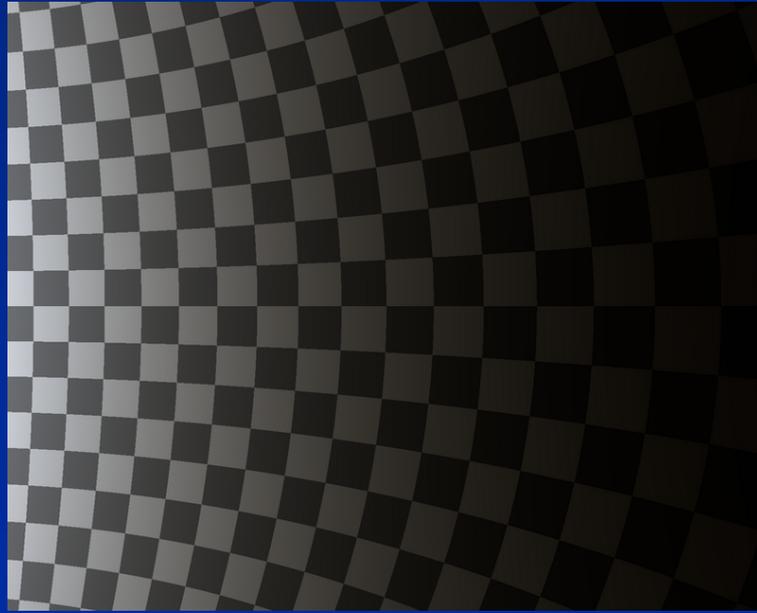
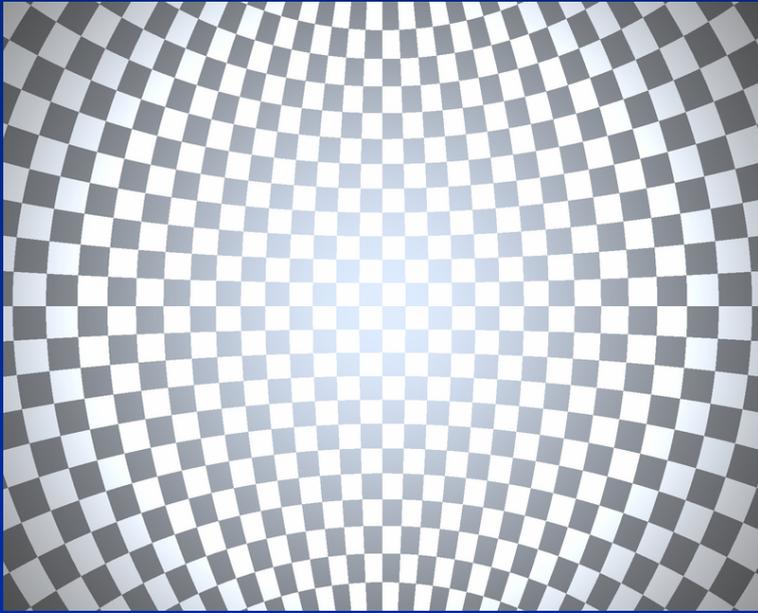
Exemples :  $v = 50\%$  de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière **aberration seule**



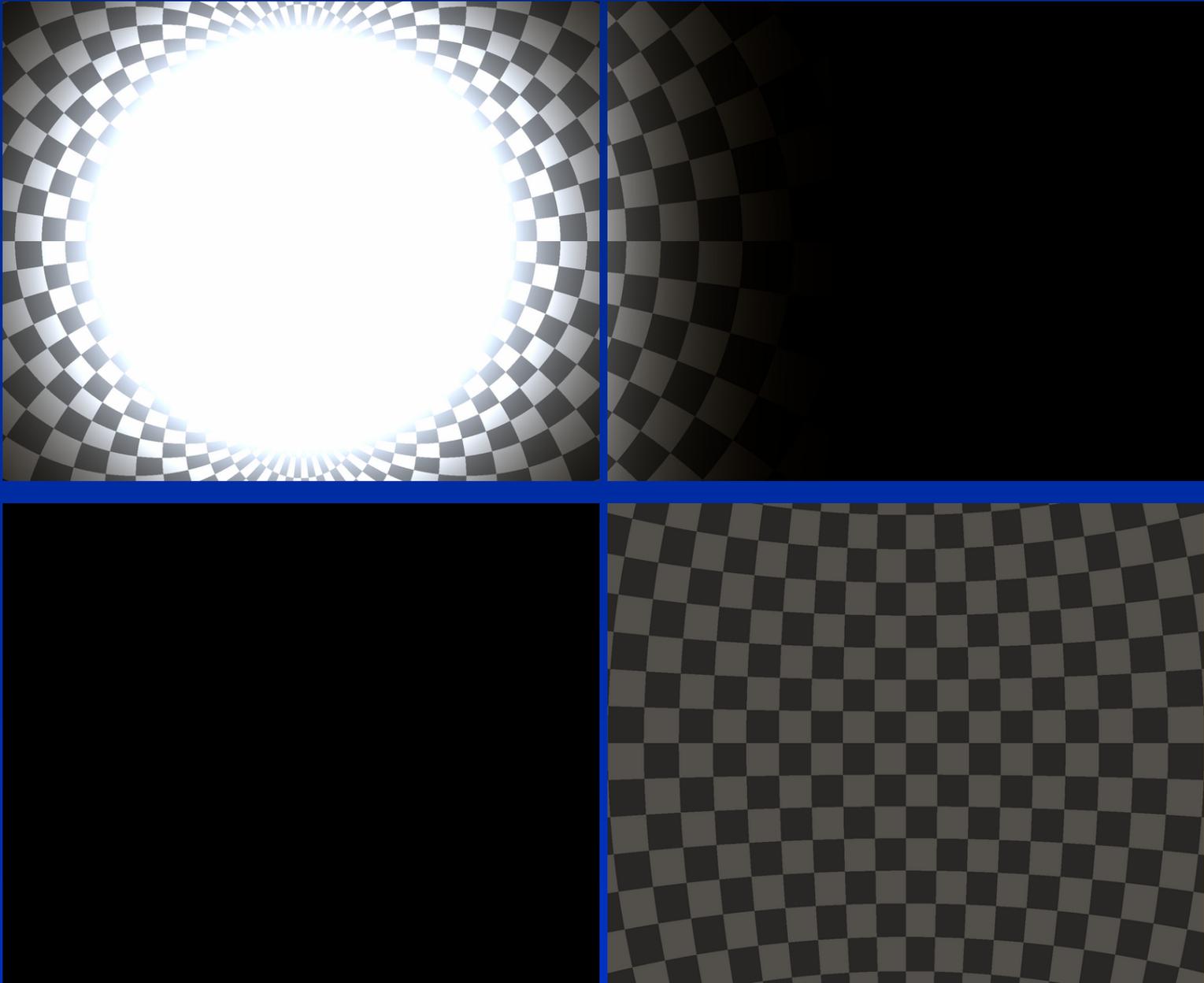
Exemples :  $v = 50\%$  de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière **aberration + Doppler**



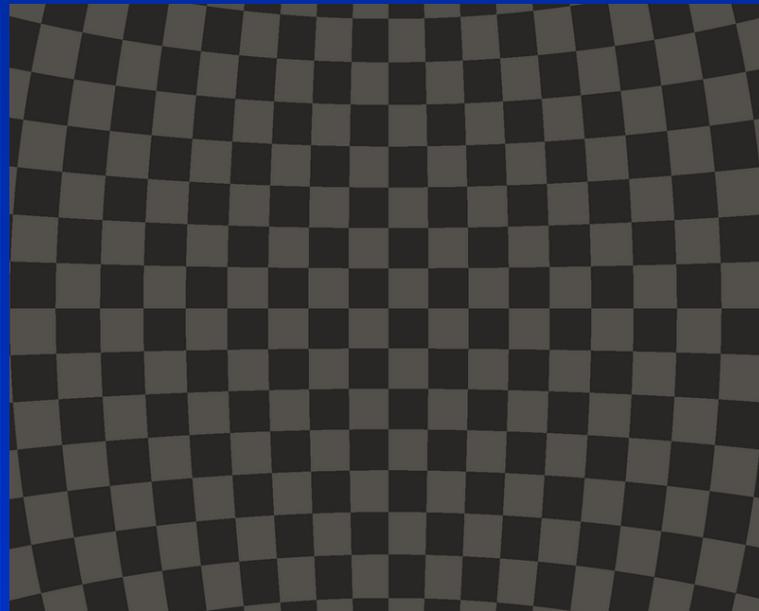
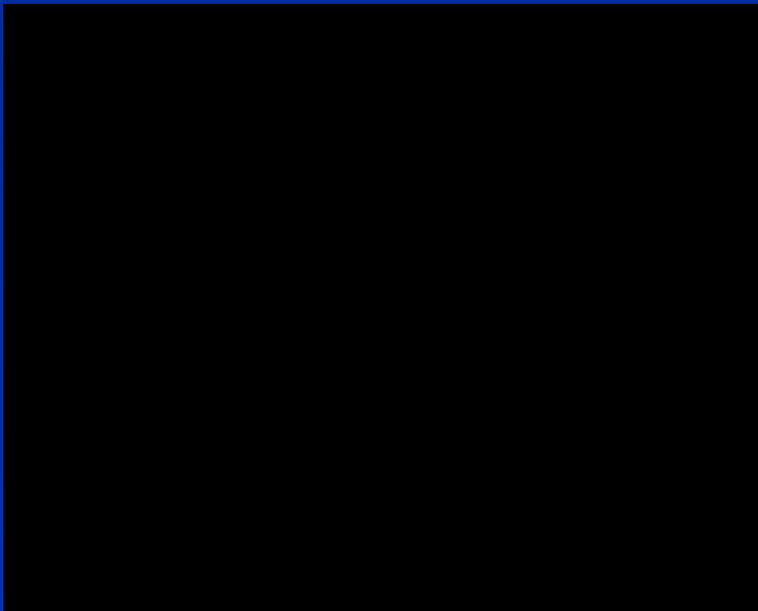
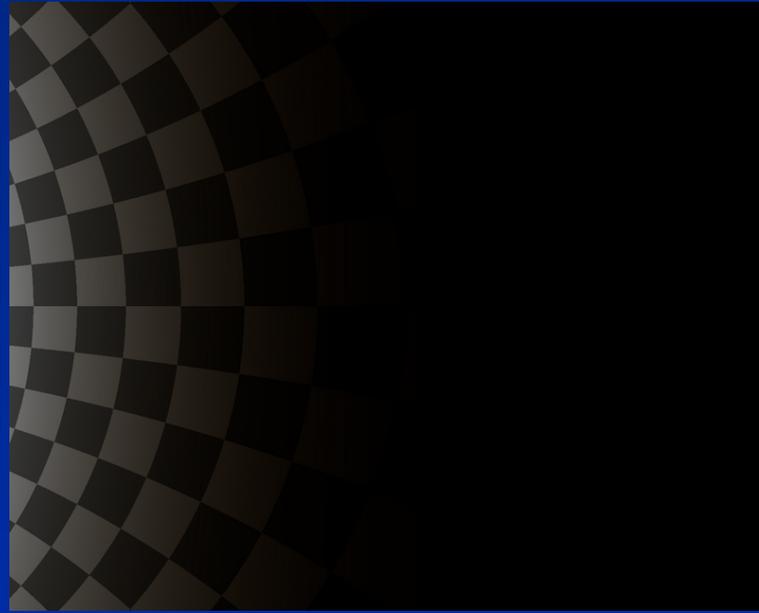
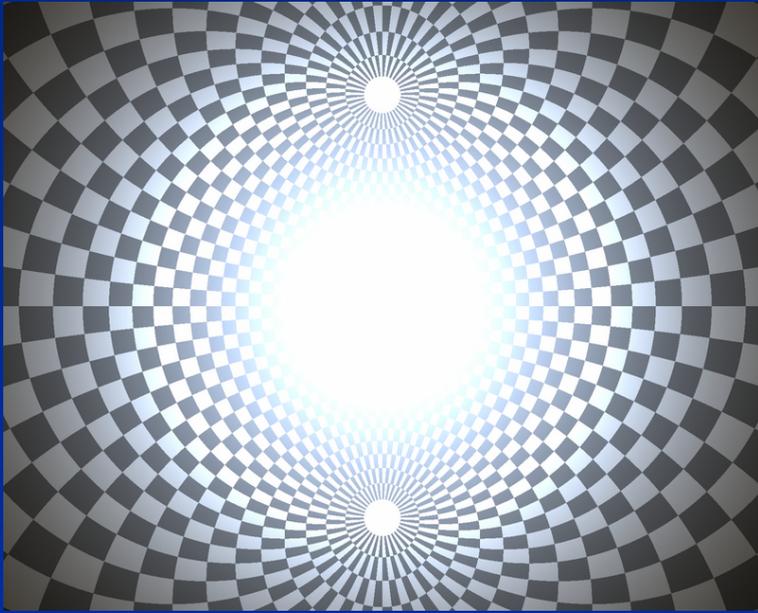
Exemples :  $v = 50\%$  de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière **aberration + Doppler + intensité**



Exemples :  $v = 90\%$  de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière aberration + Doppler + intensité



Exemples :  $v = 90\%$  de la vitesse de la lumière, intensité corrigée, vues devant, droite, derrière



# Exemple d'accélération relativiste

ou : que verrait-on en allant rendre visite à un cousin de M. Spock habitant  $\epsilon$  Eridani ?

♣ Passage de  $v = 0$  à  $v = 0.995c$  avec accélération  $a$  constante

♣ Durée de l'accélération  $t = 3 \text{ min } 20$ , d'où

$$a \sim 450\,000 \text{ g}$$

♣ À titre de comparaison :

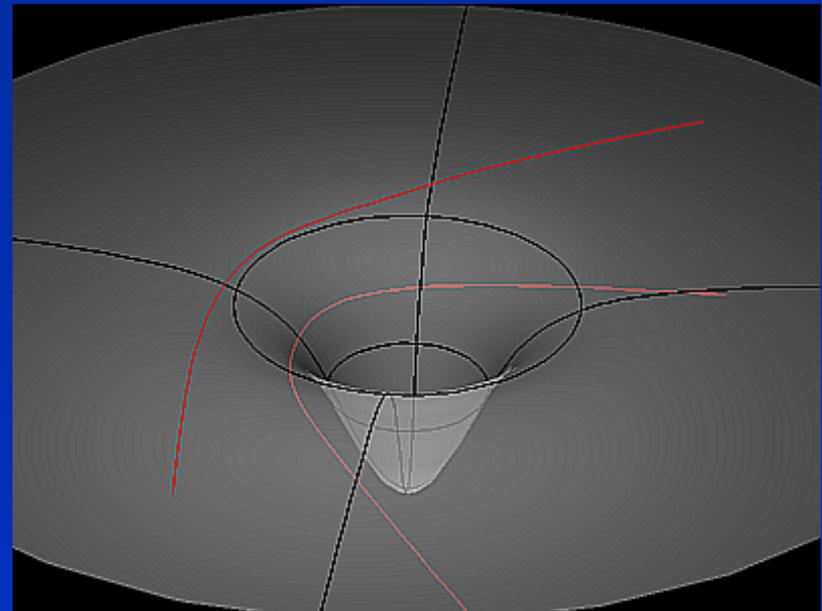
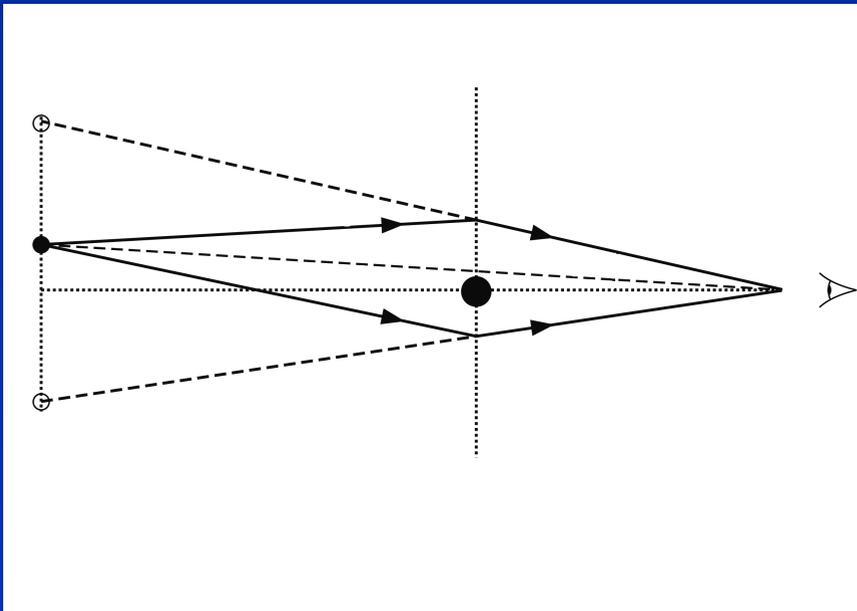
■ Aéronautique :  $a_{\text{max}}^{\text{cont}} \sim 10 \text{ g}$

■ Accidentologie sports mécaniques :  $a_{\text{max}}^{\text{choc}} \sim 214 \text{ g}$ ,  $\Delta l = 2 \text{ m}$ ,  $\Delta v = 320 \text{ km/h}$ ,  
 $\Delta t \sim 0.040 \text{ s}$  (K. Bräck, Texas Motor Speedway 2003)

♣ Accélération "réaliste" : 30 images/seconde  $\rightarrow$  5 images/jour,  $t \rightarrow 3 \text{ ans}...$

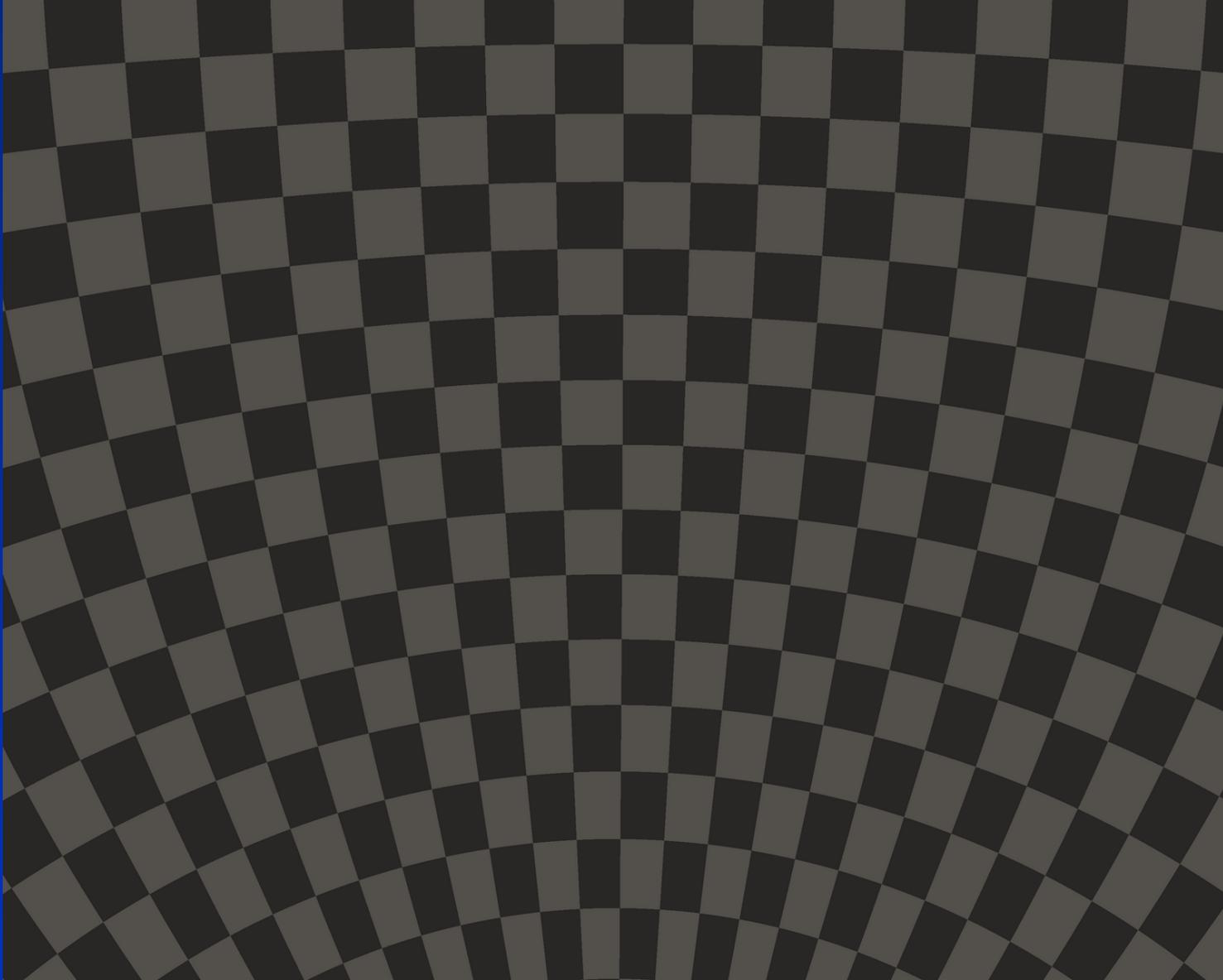
# Les trous noirs (I)

- ♣ Ils possèdent un champ gravitationnel très intense
- ♣ Ils sont invisibles mais détectables par l'influence qu'ils exercent sur la matière environnante :
  - La matière qui tombe dessus est chauffée donc très lumineuse (trous noirs stellaires, quasars)
  - Ils modifient la trajectoire des corps célestes voisins (Sgr A\*)
- ♣ Ils sont capable de modifier la **trajectoire** et l'**énergie** de la **lumière**



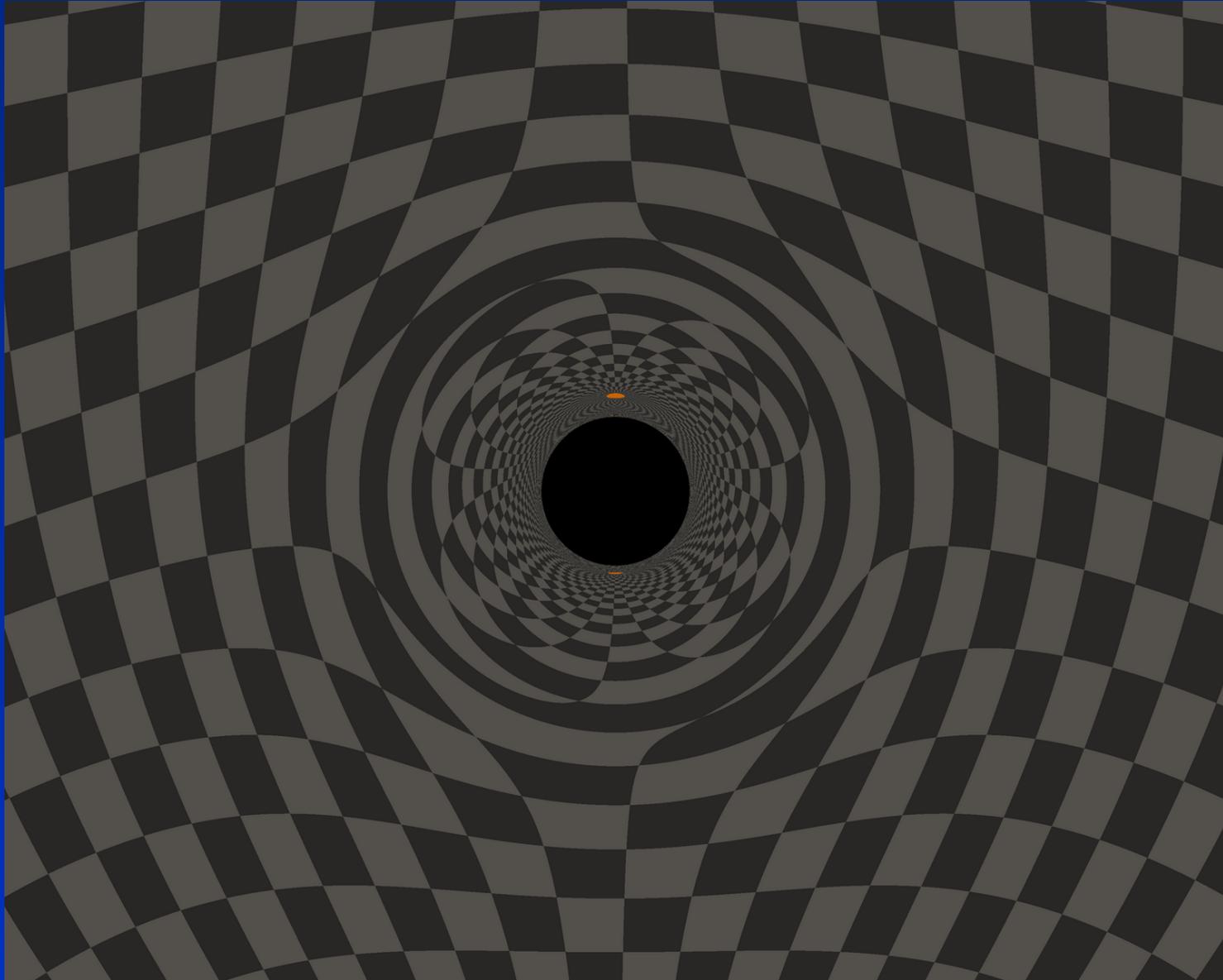
# Effets gravitationnels sur la lumière (I)

Sans trou noir



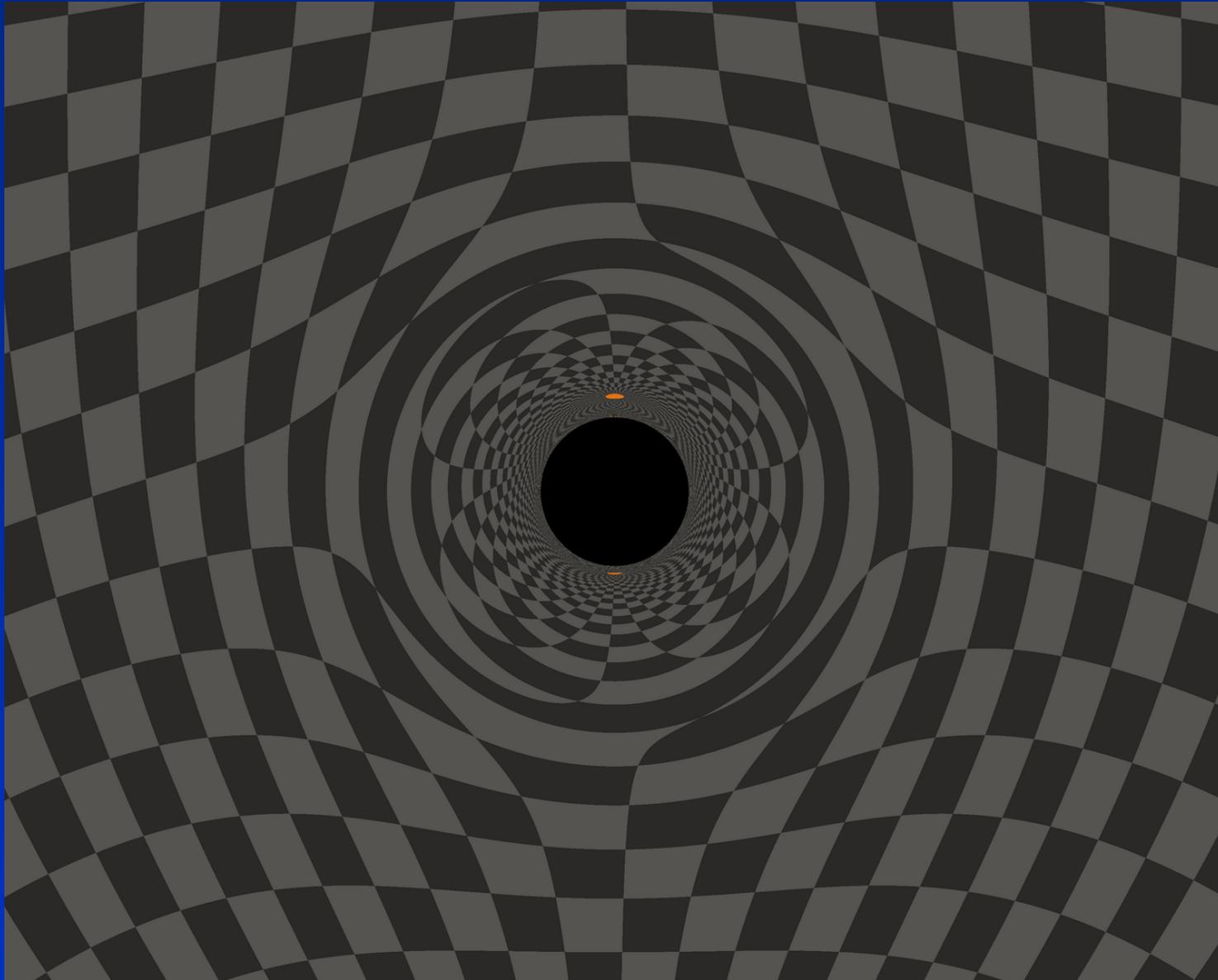
# Effets gravitationnels sur la lumière (II)

Trou noir, déflexion seule



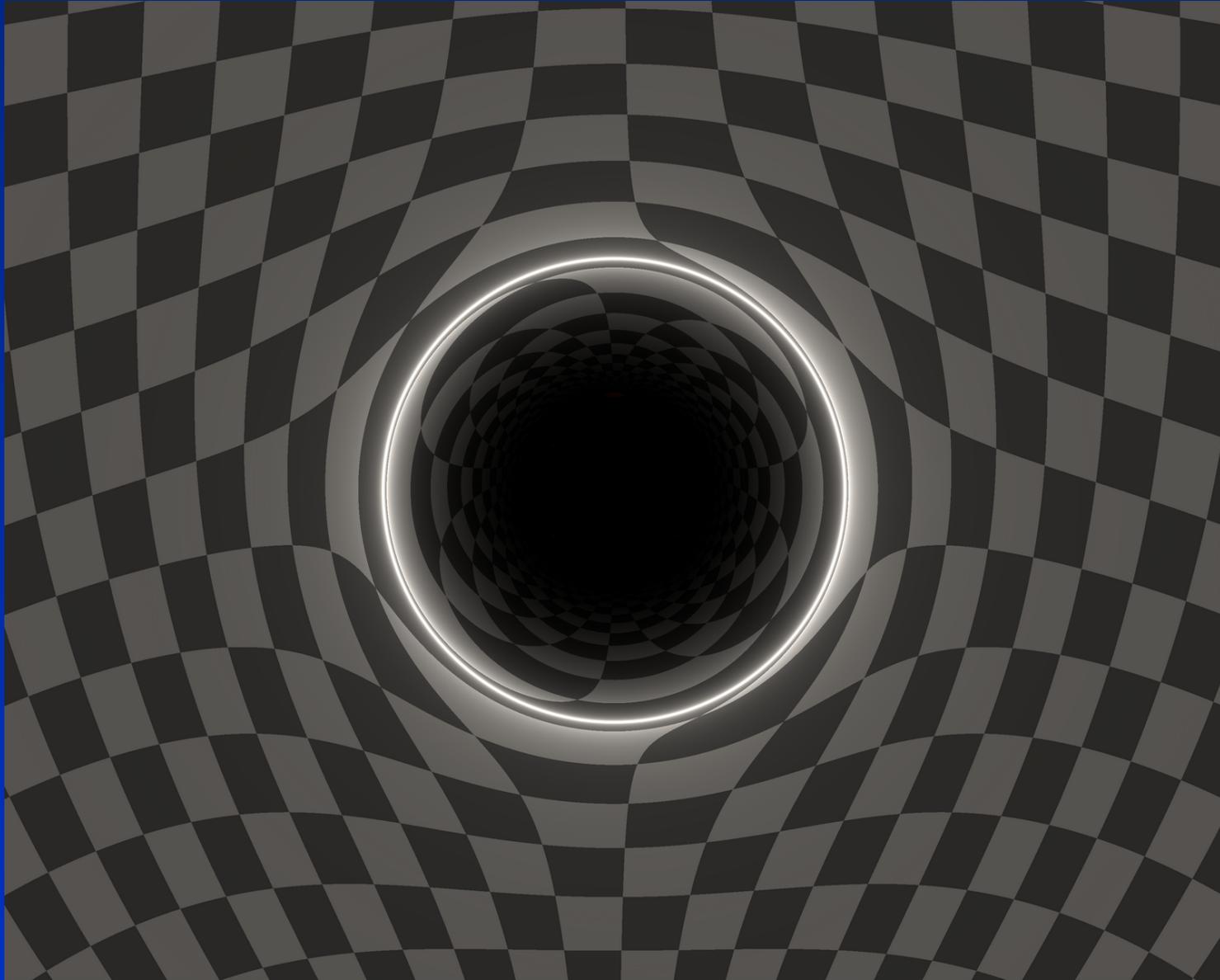
# Effets gravitationnels sur la lumière (III)

Trou noir, déflexion + décalage vers le bleu (la lumière gagne de l'énergie en tombant sur un trou noir)



# Effets gravitationnels sur la lumière (IV)

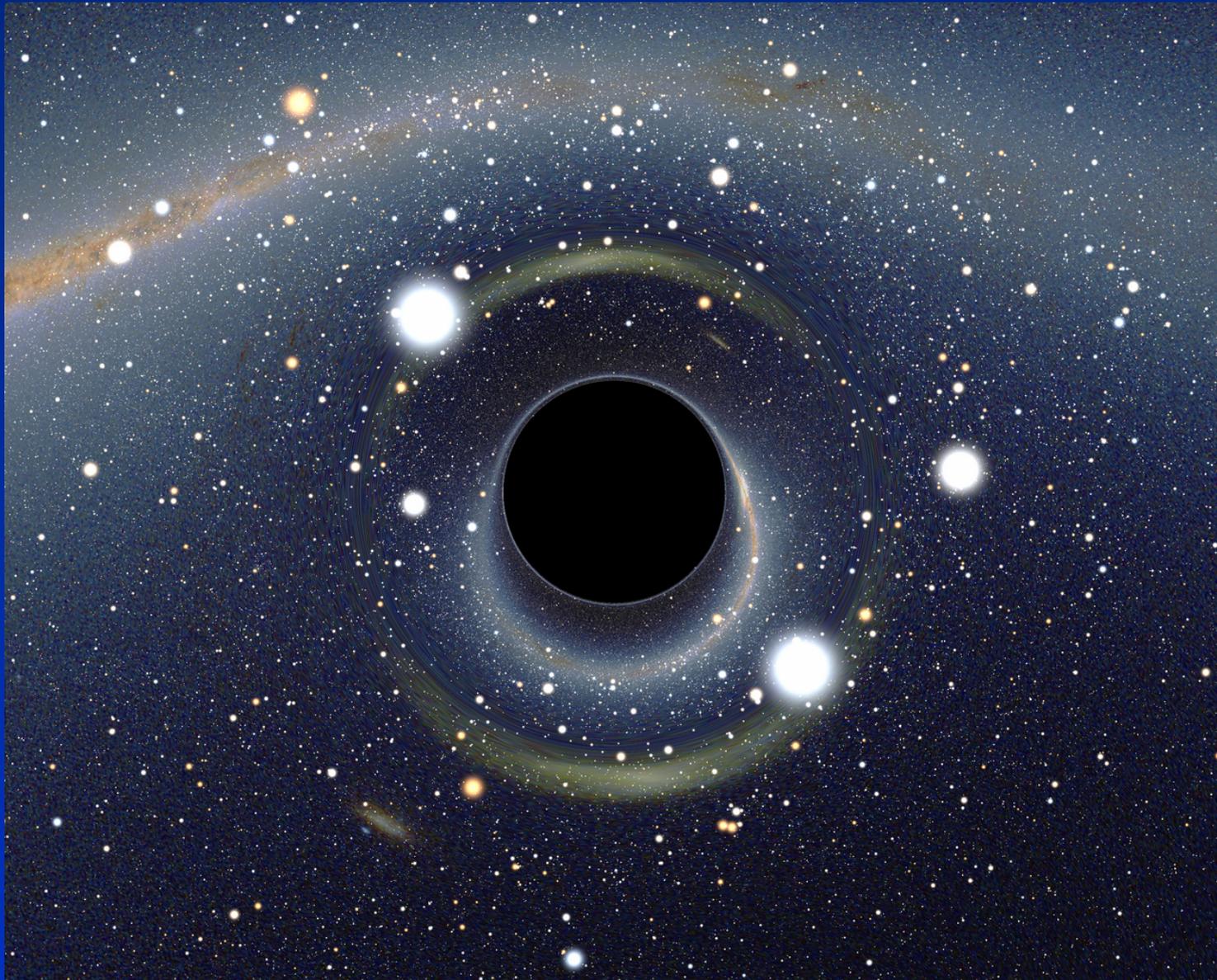
Trou noir, déflexion + amplification (modification par le trou noir de la taille de certaines régions)



# Les trous noirs (II)

- ♣ Ils sont capable de modifier la trajectoire et l'énergie de la lumière
- ♣ La région située exactement derrière un trou noir n'est pas cachée par celui-ci mais apparaît sous la forme d'un anneau (l'anneau d'Einstein)
- ♣ La luminosité de cette région est considérablement amplifiée : c'est le phénomène de "lentille gravitationnelle"
- ♣ Il existe une copie de la sphère céleste à l'intérieur de l'anneau d'Einstein et des images multiples de chaque objet
- ♣ Illustrations...

# En prenant tout en compte...



# En orbite autour d'un trou noir

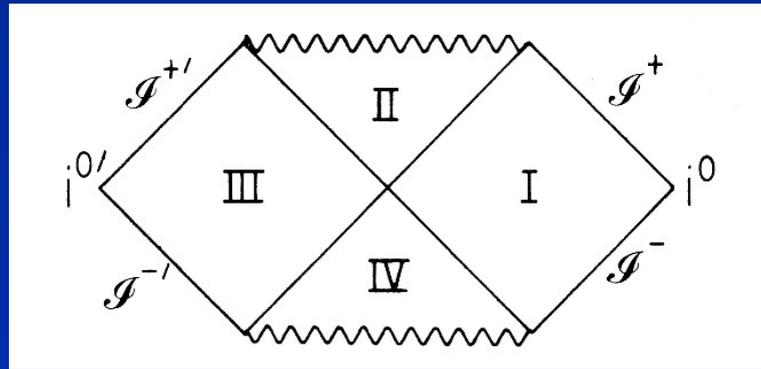
♣ Quelques exemples de trajectoires :

- Circulaire “loin” du trou noir
- Circulaire “près” du trou noir
- “Elliptique”
- “Parabolique”
- “Hyperboliques”
- Au plus près

# Dans l'horizon...

- ♣ Un trou noir est un objet qui se forme à un moment donné
  - On peut aller voir (sans espoir de retour) ce qu'il y a dedans...
  - Illustration...

- ♣ Mais il existe d'autres solutions décrivant ces objets : les trous noirs éternels



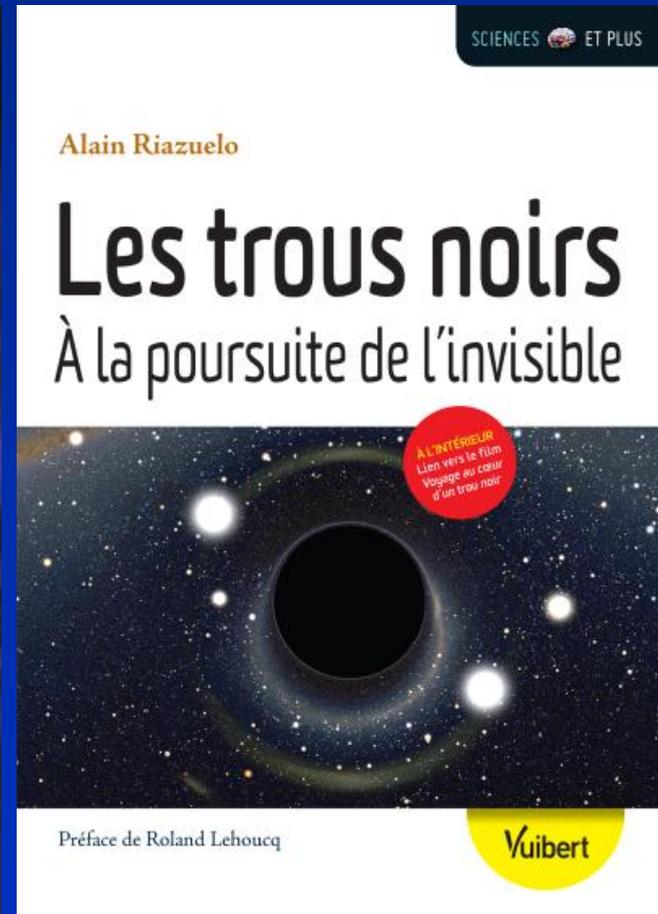
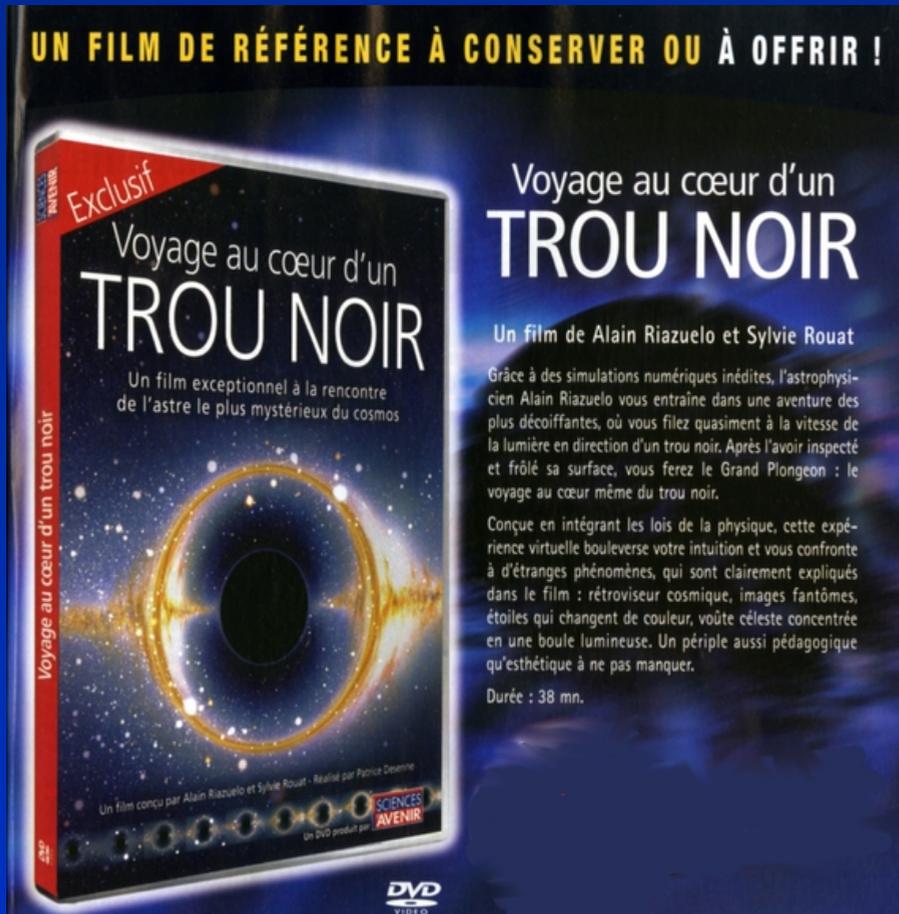
- De tels objets ne sont pas présents dans l'Univers
- Une configuration de type trou noir éternel décrit en réalité deux Univers "reliés" par le trou noir
- Ces régions ont chacune une entrée dans le trou noir
- On peut entrer dans le trou noir en provenance de deux univers différents, mais on ne peut toujours pas en sortir
- Quelques illustrations...

# D'autres types de trous noirs

- ♣ Il existe d'autres types de trous noirs éternel, en rotation sur eux-mêmes ou possédant un champ électrique
- ♣ Tout comme les autres trous noirs éternels, ils ne correspondent pas à des situations astrophysiques réalistes
- ♣ ... mais possèdent des propriétés fascinantes :
  - On ne peut être piégé une fois à l'intérieur, mais au contraire, on en est forcément expulsé
  - Ils possèdent en général deux entrées et deux sorties
  - La science-fiction imagine que l'on puisse éventuellement passer au travers sans dommages (???)
- ♣ Quelques illustrations...

# Conclusion

- ♣ Ça marche !
- ♣ Et c'est très différent de ce qu'a longtemps montré la science fiction !
- ♣ Pour en (sa)voir plus



En vente dans toutes les (bonnes) librairies