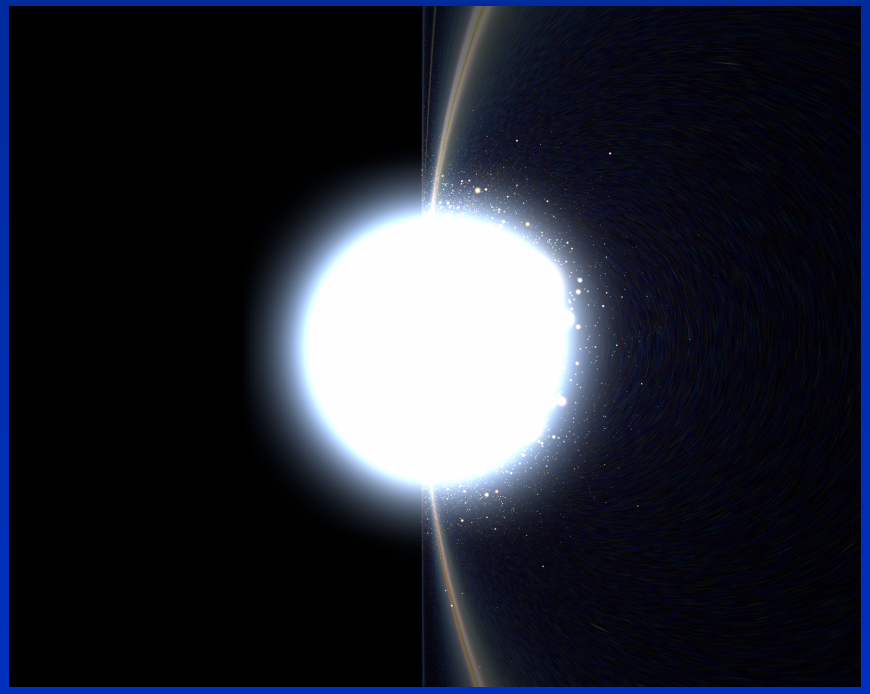
Les trous noirs

Alain Riazuelo

Institut d'astrophysique de Paris

Conférence AMA Orsay, 5 février 2009



Qu'est-ce qu'un trou noir ?

- Un trou noir est un objet dont le champ gravitationnel est si intense qu'il empêche la lumière de s'échapper

- Il existe (au moins) deux types de trous noirs et peut-être deux autres
  - Les trous noirs stellaires, issus de l'évolution des étoiles massives. Leur mode de formation est (plutôt) bien compris
    - Nombre : plusieurs dizaines de millions par galaxies comme la nôtre.
    - 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
  - Il existe probablement d'autres trous noirs dits "trous noirs intermédiaires"
    - Nombre : ?
    - Masse : de quelques milliers à quelques centaines de milliers de masses solaires
  - Il existe peut-être des trous noirs beaucoup plus petits formés lors du Big Bang (trous noirs primordiaux)
    - Nombre : ? mais pas trop sinon on les aurait vus
    - Masse : ? mais a priori beaucoup plus petite qu'une masse solaire

Du concept à la réalité physique
1. L'aspect mathématique

- 1676 : Ole Romer mesure la vitesse de la lumière (environ 300 000 km/s)
- 1685 : Isaac Newton écrit les lois de la gravitation universelle
- 1784-1796 : Naissance du concept de trou noir (John Michell puis Simon de Laplace), impossible à formaliser correctement dans le cadre de la théorie newtonienne
- 1915 : Einstein écrit les équations de la relativité générale
- 1916 : Karl Schwarzschild écrit les équations décrivant un trou noir. On parle alors d'"astre occlus" ou de "corps de Schwarzschild"
- 1939 : Einstein "démontre" que les trous noirs n'existent pas
- 1939 : Oppenheimer décrit l'effondrement d'une étoile idéalisée en trou noir
- 1960-1970 : "Âge d'or" de l'étude des trous noirs

Du concept à la réalité physique
2. L'aspect astrophysique et physique nucléaire

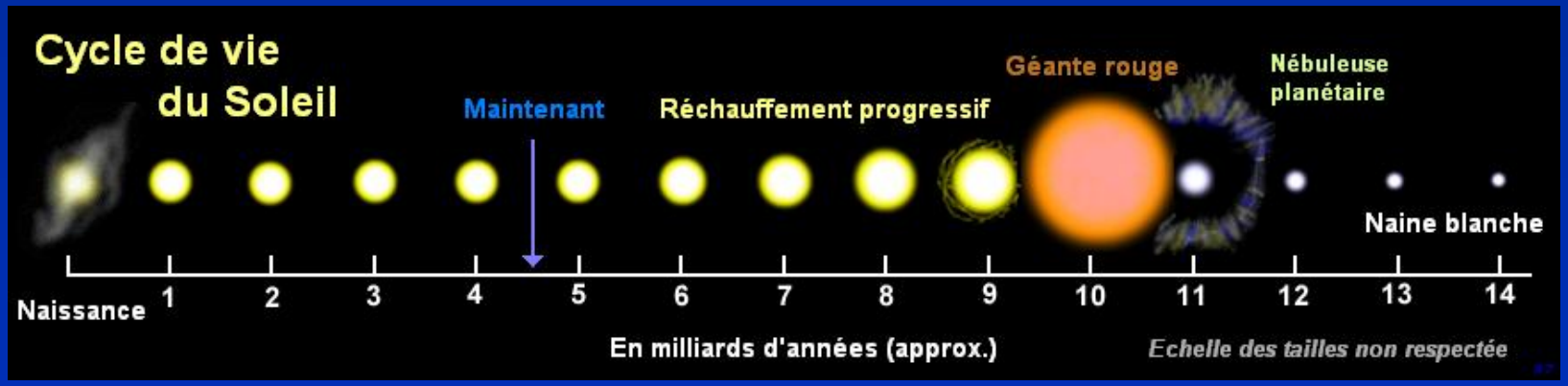
- 1885 : Une "nova" est observée dans la "Nébuleuse d'Andromède"
- 1896 : Henri Becquerel découvre la radioactivité
- 1920 : Arthur Eddington décrit la structure interne des étoiles
- 1926 : Naissance de la mécanique quantique ; concept de pression de dégénérescence
- 1926 : Edwin Hubble prouve la nature extragalactique de la Nébuleuse d'Andromède
- 1930 : Subrahmanyan Chandrasekhar décrit les configurations stellaires denses ("mortes") où intervient le pression de dégénérescence des électrons
- 1931 : Eddington s'oppose à Chandrasekhar sur le devenir d'un astre qui dépasserait la limite de Chandrasekhar
- 1932 : James Chadwick découvre le neutron
- 1933 : Walter Baade et Fritz Zwicky proposent le mécanisme physique qui décrit les "super-novae" dont la nova d'Andromède est sans doute un représentant
- 1935-1938 : Hans Bethe décrit la source d'énergie des étoiles
- 1960 (env.) : compréhension de la formation d'une étoile à neutrons ou d'un trou noir des suites de l'évolution d'une étoile massive
- 1967 : John Wheeler popularise l'expression "trou noir"

Du concept à la réalité physique
3. L'aspect astronomique

- 1054 : Des astronomes chinois relatent l'observation d'une "étoile invitée" à proximité de l'étoile ζ Tauri
- 1731 : Lord Rosse découvre la Nébuleuse du Crabe
- 1846 : Biot et Biot transmettent aux astronomes européens les témoignages chinois de l'étoile invitée de 1054
- 1862 : Alvan Clark découvre le premier astre compact (Sirius B)
- 1928 : Edwin Hubble établit le lien entre la Nébule du Crabe et l'étoile invitée de 1054
- 1960-1962 : Découverte en radio des quasars, ainsi que de leur contrepartie optique
- 1964 : Boris Yakov Zel'dovitch propose que les quasars résulte du rayonnement d'énormes quantités de matière en train d'être englouties par un trou noir supermassif
- 1965 : Découverte de Cygnus X-1 par un détecteur de rayons X embarqué sur une fusée
- 1967 : Jocelyn Bell découvre la première étoile à neutrons, sous la forme d'un pulsar (PSR B1919+21)
- 1968 : Staelin et Reifenstein découvrent le pulsar du Crabe
- 1971 : Identification de Cygnus X-1 comme étant un "candidat trou noir" stellaire
- 1987 : Confirmation de la théorie des supernovae avec l'observation en direct de l'explosion d'une supernova proche (SN 1987A dans le Grand Nuage de Magellan)
- 2002 : Cartographie des étoiles en orbite autour du centre galactique, Sgr A*
- 2017 (?) : Première image interférométrique d'un trou noir

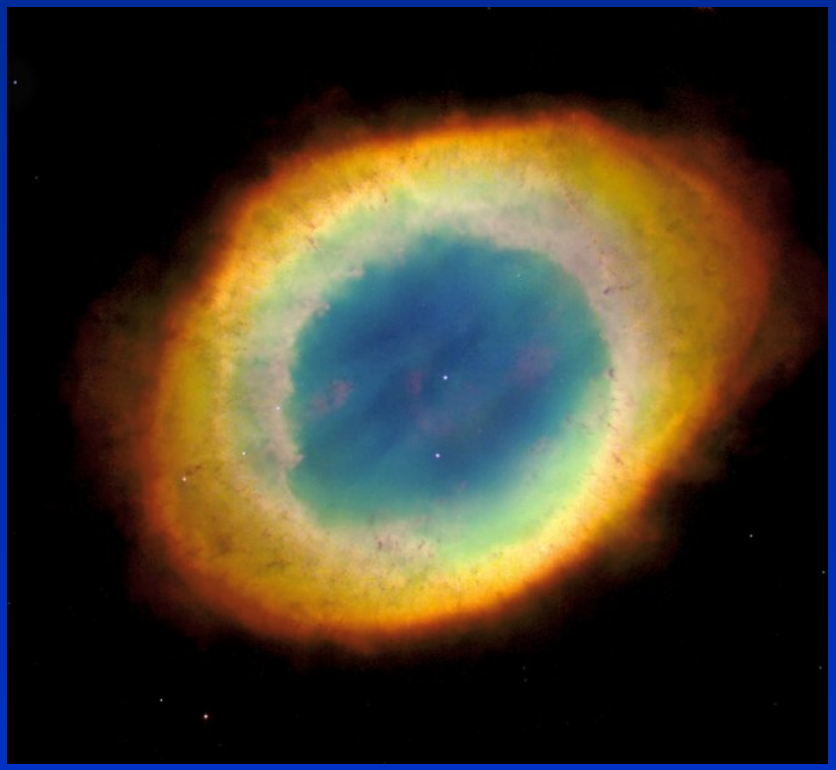
Les étoiles

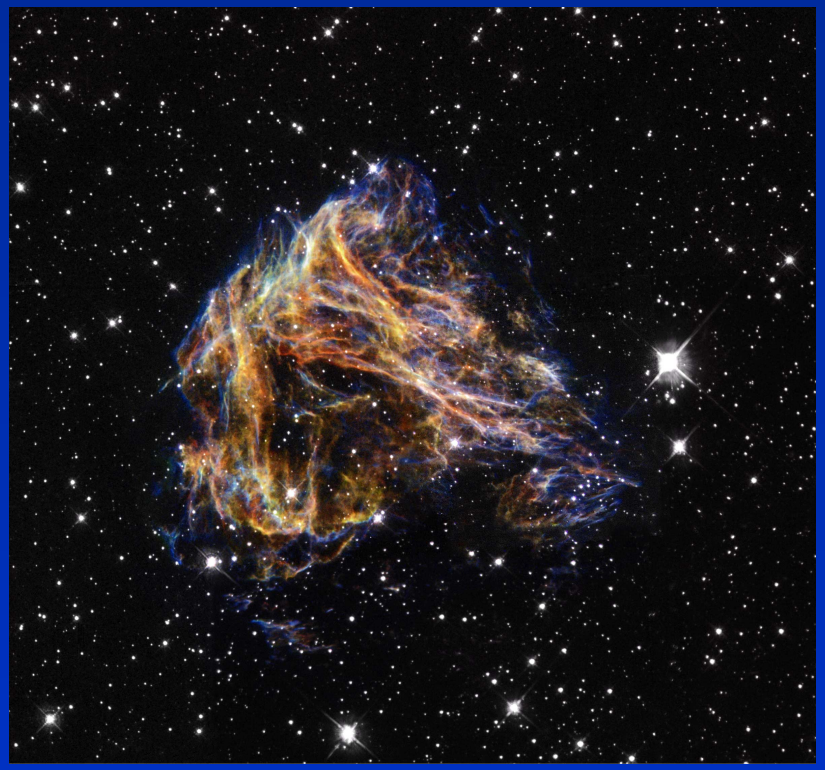
- Une étoile, c'est :
  - Un nuage de gaz qui se contracte,
  - s'échauffe
  - s'allume (réactions nucléaires)
  - se stabilise
  - se réorganise de temps en temps (changement de réactions nucléaires)
  - s'éteint plus ou moins violemment



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 $\longrightarrow$ Nébuleuse planétaire + Naine blanche (g.)
- Les étoiles plus massives explosent en fin de vie $\longrightarrow$ Supernova $\longrightarrow$ Rémanent de supernova + Étoile à neutrons ou Trou noir (d.)



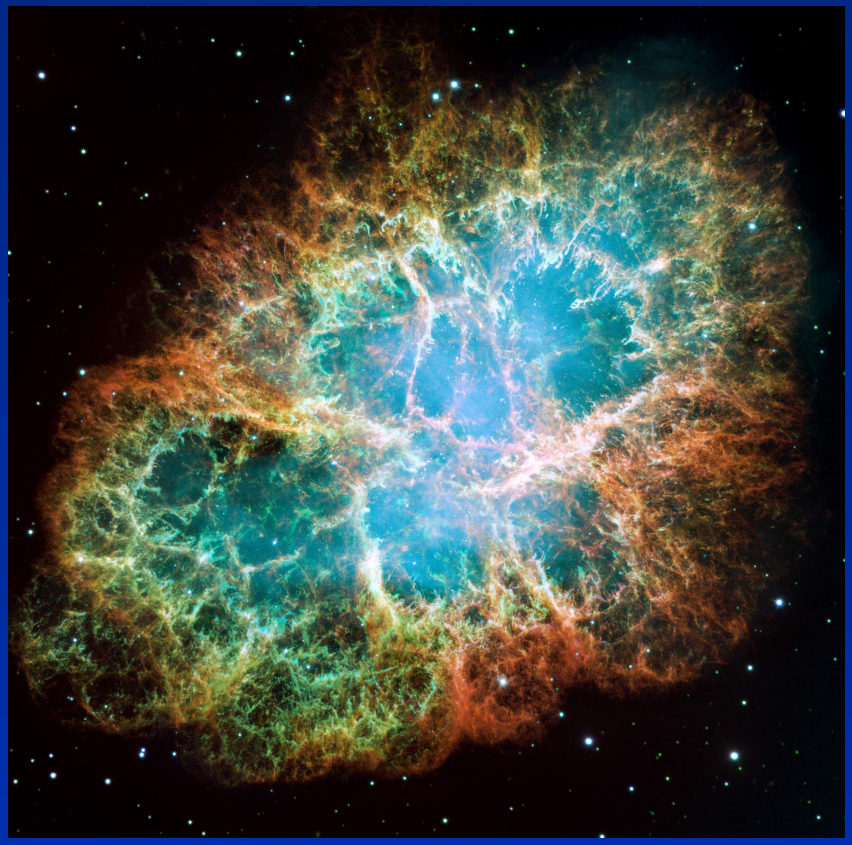


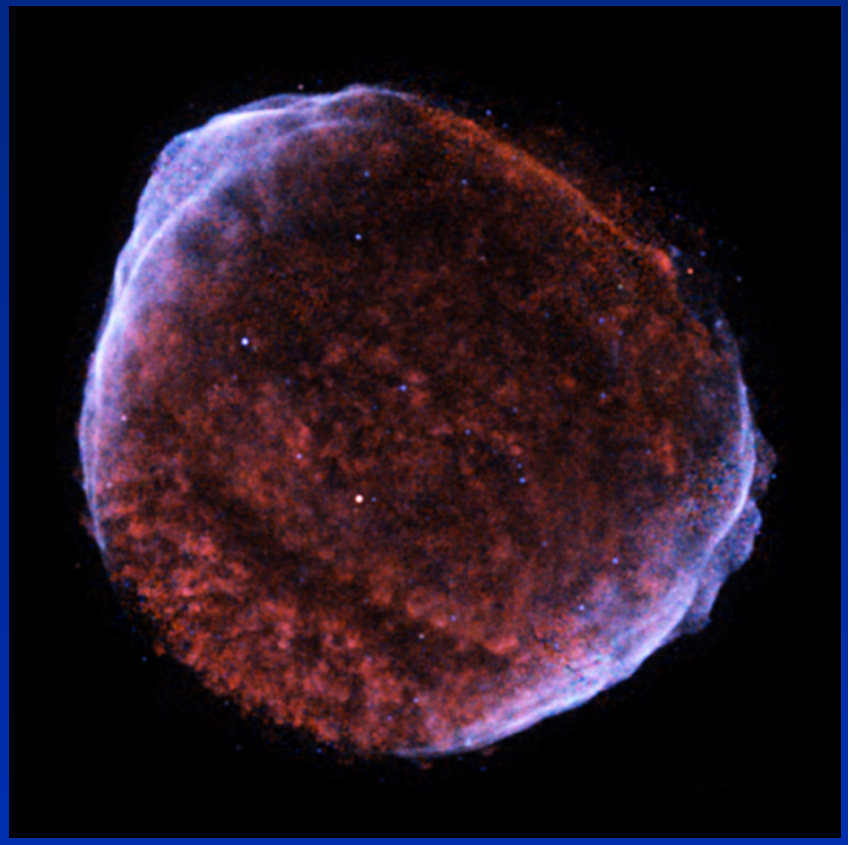
Les supernovae (I)

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

- Une supernova, c'est :
  - L'explosion et la destruction totale d'un cadavre stellaire (naine blanche) quand celui-ci dépasse une masse critique (masse de Chandrasekhar) $\longrightarrow$ Supernova thermonucléaire
- Ou alors
  - L'implosion du cœur de l'étoile du fait de l'arrêt des réactions nucléaires
  - La dislocation des couches extérieures suite à une onde de choc $\longrightarrow$ Supernova à effondrement de cœur

Les supernovae (II)



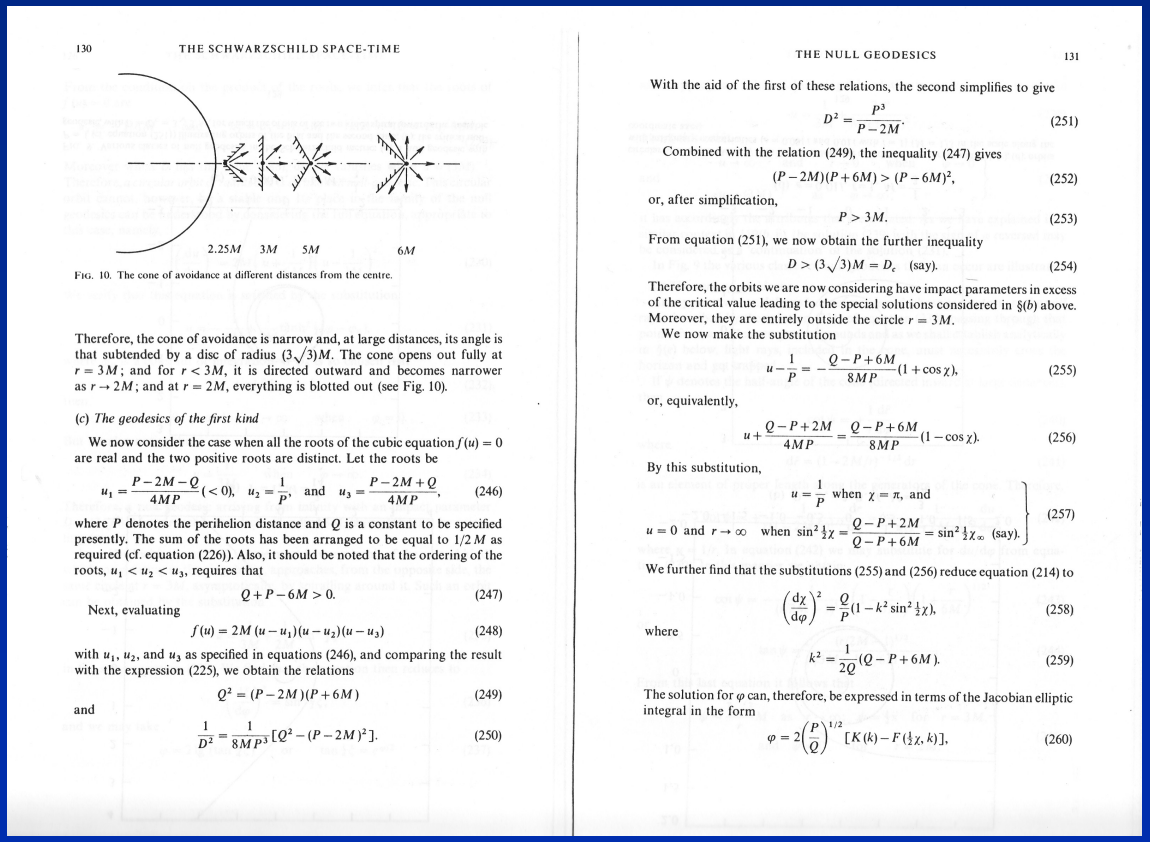


Quelques rémanents de supernova célèbres (g. : SN 1054 ; dr. : SN 1006)

♣ 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, 201?...)

À quoi ressemble un trou noir ?



130 THE SCHWARZSCHILD SPACE-TIME

FIG. 10. The cone of avoidance at different distances from the centre.

Therefore, the cone of avoidance is narrow and, at large distances, its angle is that subtended by a disc of radius $(3\sqrt{3})M$. The cone opens out fully at $r = 3M$; and for $r < 3M$, it is directed outward and becomes narrower as $r \to 2M$; and at $r = 2M$, everything is blotted out (see Fig. 10).

(c) *The geodesics of the first kind*

We now consider the case when all the roots of the cubic equation $f(u) = 0$ are real and the two positive roots are distinct. Let the roots be

$$u_1 = \frac{P-2M-Q}{4MP} (<0), \quad u_2 = \frac{1}{P}, \quad \text{and} \quad u_3 = \frac{P-2M+Q}{4MP}, \tag{246}$$

where P denotes the perihelion distance and Q is a constant to be specified presently. The sum of the roots has been arranged to be equal to $1/2M$ as required (cf. equation (226)). Also, it should be noted that the ordering of the roots, $u_1 < u_2 < u_3$, requires that

$$Q + P - 6M > 0. \tag{247}$$

Next, evaluating

$$f(u) = 2M(u-u_1)(u-u_2)(u-u_3) \tag{248}$$

with u_1, u_2, and u_3 as specified in equations (246), and comparing the result with the expression (225), we obtain the relations

$$Q^2 = (P-2M)(P+6M) \tag{249}$$

and

$$\frac{1}{D^2} = \frac{1}{8MP^3}[Q^2 - (P-2M)^2]. \tag{250}$$

THE NULL GEODESICS 131

With the aid of the first of these relations, the second simplifies to give

$$D^2 = \frac{P^3}{P-2M}. \tag{251}$$

Combined with the relation (249), the inequality (247) gives

$$(P-2M)(P+6M) > (P-6M)^2, \tag{252}$$

or, after simplification,

$$P > 3M. \tag{253}$$

From equation (251), we now obtain the further inequality

$$D > (3\sqrt{3})M = D_c \quad \text{(say)}. \tag{254}$$

Therefore, the orbits we are now considering have impact parameters in excess of the critical value leading to the special solutions considered in §(b) above. Moreover, they are entirely outside the circle $r = 3M$.

We now make the substitution

$$u - \frac{1}{P} = -\frac{Q-P+6M}{8MP}(1+\cos\chi), \tag{255}$$

or, equivalently,

$$u + \frac{Q-P+2M}{4MP} = \frac{Q-P+6M}{8MP}(1-\cos\chi). \tag{256}$$

By this substitution,

$$\left.\begin{aligned} &u = \frac{1}{P} \text{ when } \chi = \pi, \text{ and} \\ &u = 0 \text{ and } r \to \infty \text{ when } \sin^2\tfrac{1}{2}\chi = \frac{Q-P+2M}{Q-P+6M} = \sin^2\tfrac{1}{2}\chi_\infty \text{ (say).} \end{aligned}\right\} \tag{257}$$

We further find that the substitutions (255) and (256) reduce equation (214) to

$$\left(\frac{d\chi}{d\varphi}\right)^2 = \frac{Q}{P}(1 - k^2\sin^2\tfrac{1}{2}\chi), \tag{258}$$

where

$$k^2 = \frac{1}{2Q}(Q-P+6M). \tag{259}$$

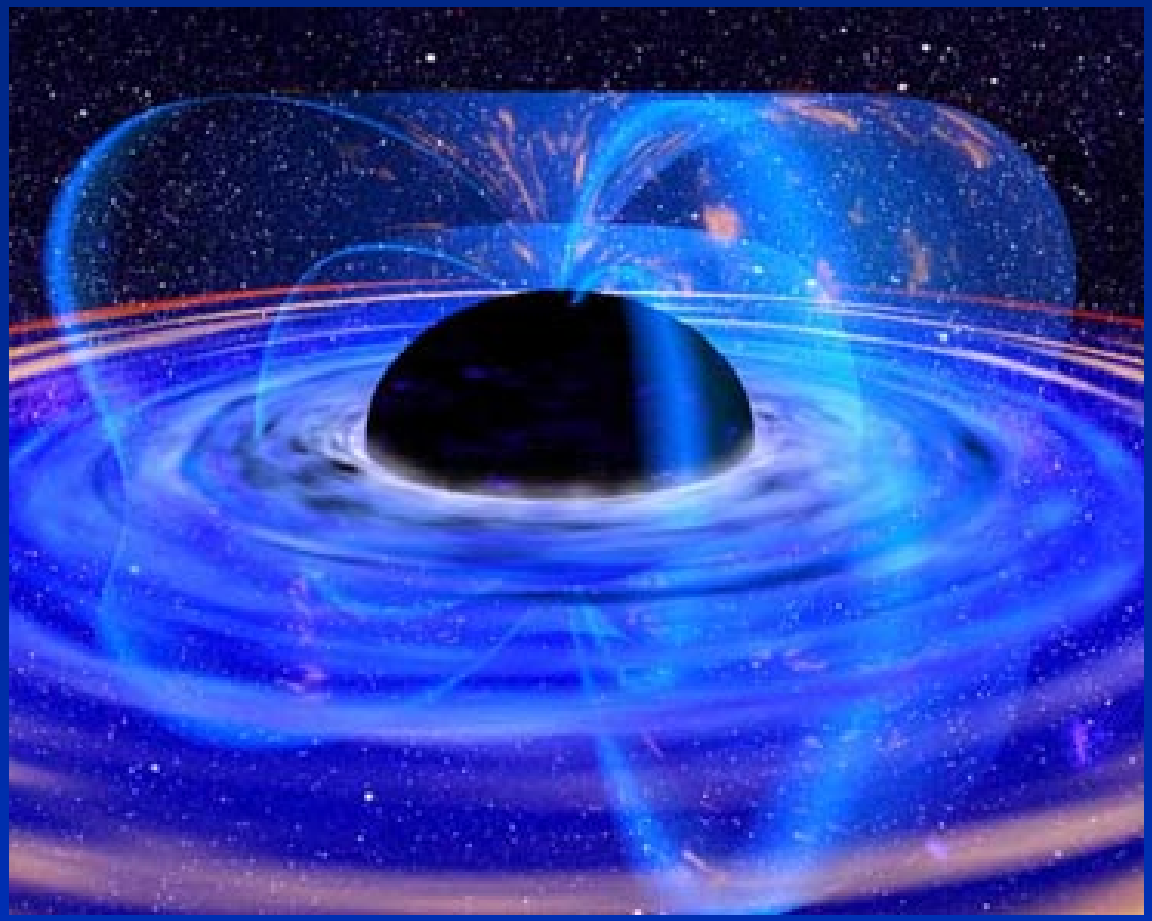
The solution for φ can, therefore, be expressed in terms of the Jacobian elliptic integral in the form

$$\varphi = 2\left(\frac{P}{Q}\right)^{1/2}[K(k) - F(\tfrac{1}{2}\chi, k)], \tag{260}$$

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
  - Déflexions de la lumière

À quoi ressemblera un trou noir ?

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

$$R_{\mathrm{S}} = \frac{2GM}{c^2} \sim \frac{M}{M_\odot} \times 3 \text{ km}$$

- Un trou noir est loin : plusieurs dizaines d'années lumières au minimum (100 000 000 000 000 de km), voire immensément plus
- Exemples :
  - Cyg X-1 : $M \sim 10 M_\odot$, $D \sim 5\,600$ al, $\theta \sim 0.6$ nas

    Note : 1 nas = détail de 1 μm vu à la distance Terre-Lune
  - Sgr A* : $M \sim 3.5 \times 10^6 M_\odot$, $D \sim 26\,000$ al, $\theta \sim 40\ \mu$as

    Note : 40 μas = détails de 40 cm vu à la distance Terre-Lune
  - M 87 : $M \sim 3.3 \times 10^9 M_\odot$, $D \sim 53\,000\,000$ al, $\theta \sim 20\ \mu$as

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

En attendant...

- 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 $\longrightarrow$ rayonnement effroyablement intense
    - Trou noir "petit" (stellaire) $\longrightarrow$ Effets de marée $\longrightarrow$ dislocation instantannée 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 ?

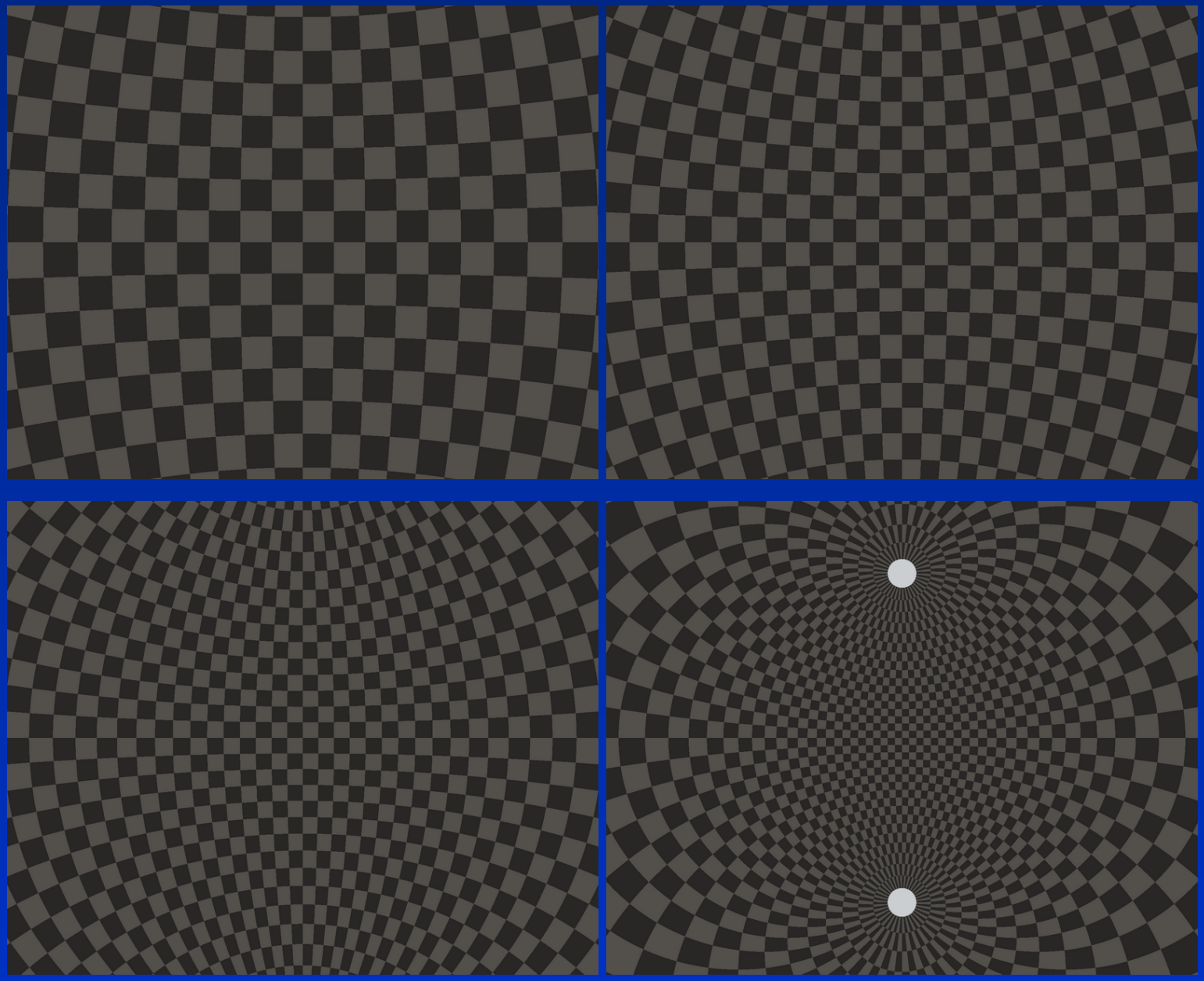
- En s'approchant d'un trou noir, on peut être accéléré à des vitesses proches de celle de la lumière
- $\longrightarrow$ Comment est vue la sphère céleste par un observateur se déplaçant à vitesse relativiste (= proche de la lumière) par rapport à celle-ci ?
- Plusieurs effets se produisent
  - Aberration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

Aberration

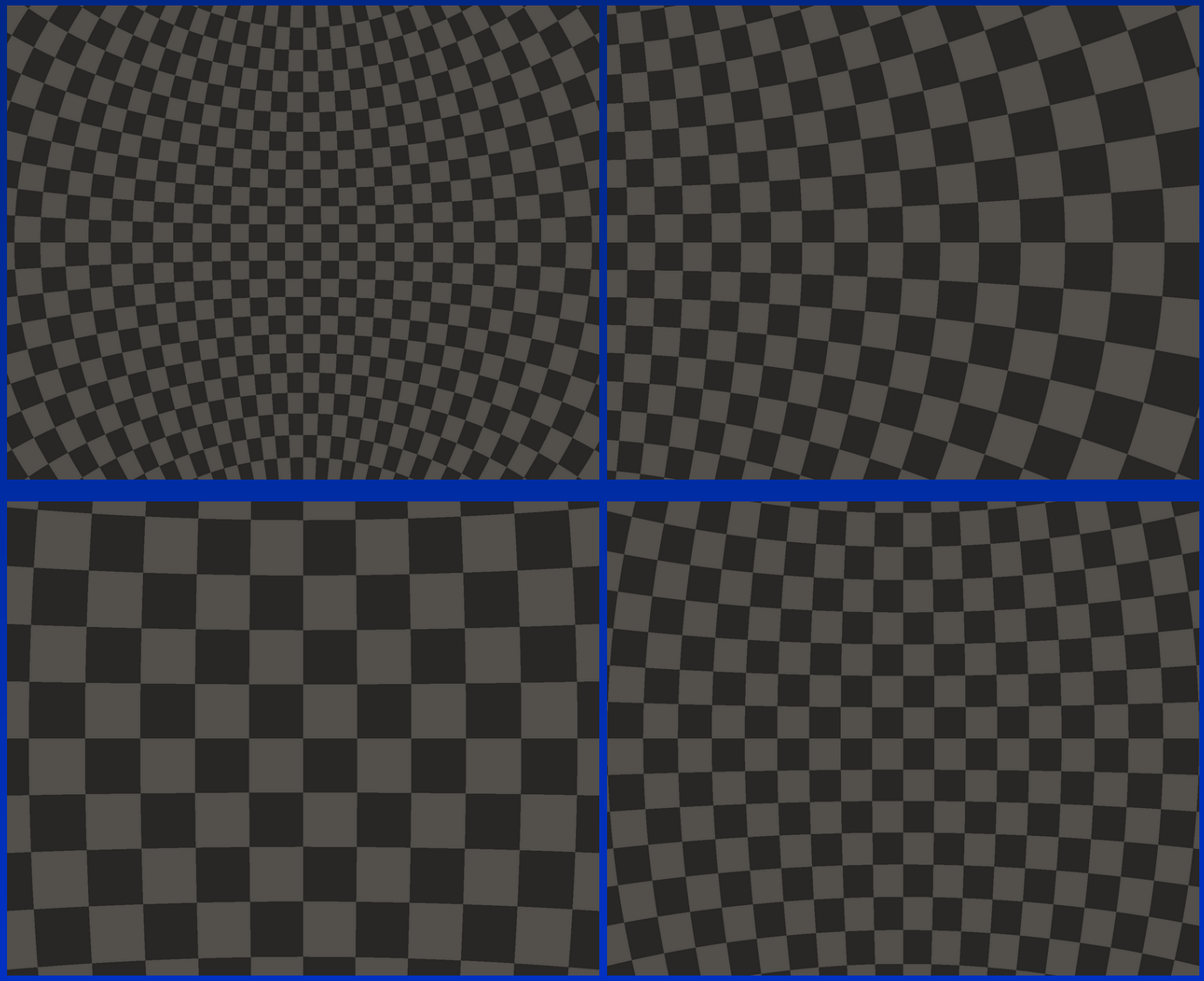
♣ Aberration = changement de la direction apparente d'un signal quand on se déplace :

- Direction du vent pour un voilier
- Pluie sur pare-brise de voiture
- Effet contre-intuitif (opposé à la parallaxe)

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



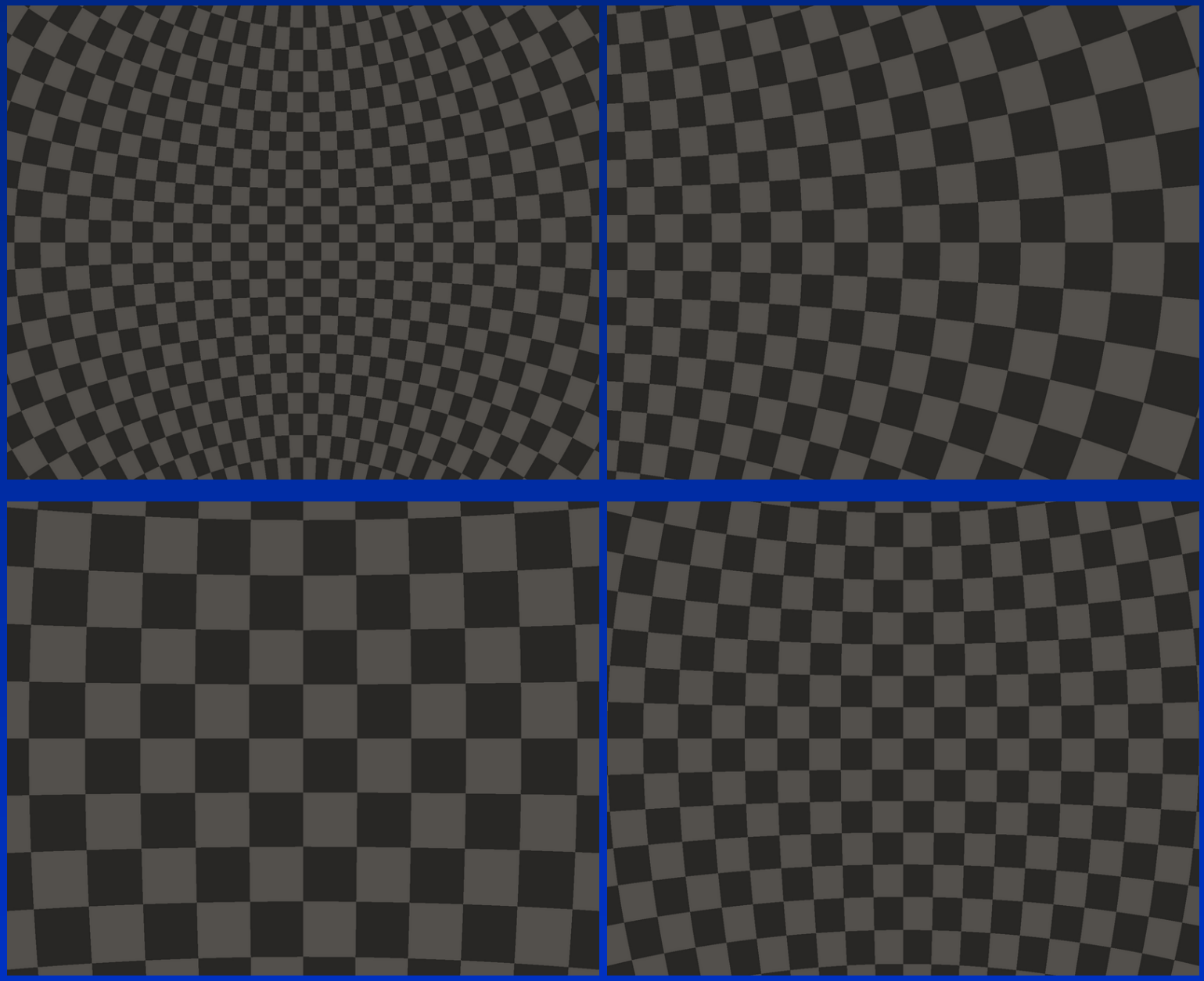
Exemples : $v = 0.5c$, vues devant, droite, derrière



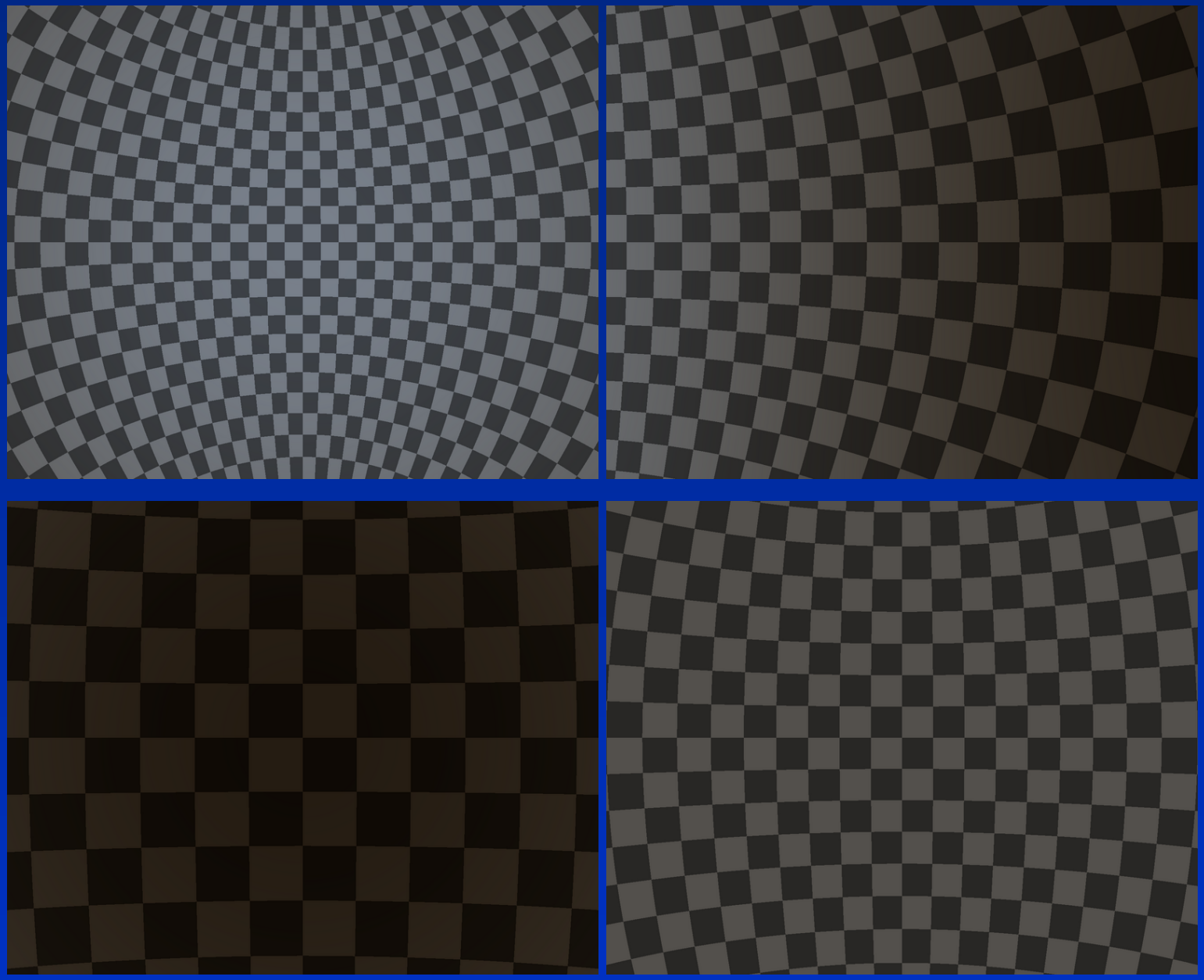
Effet Doppler

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

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

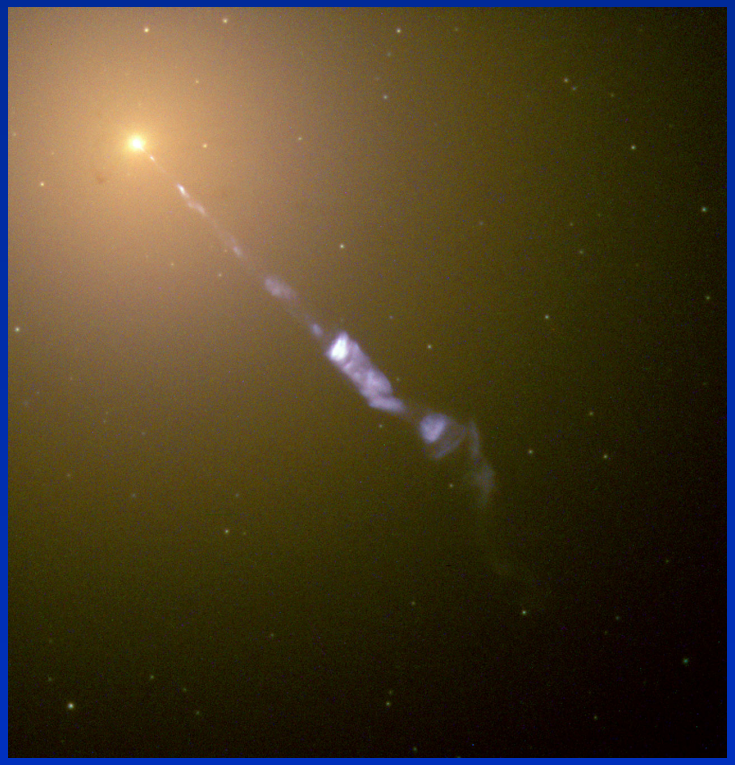


Exemples : $v = 50\%$ de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière avec terme Doppler



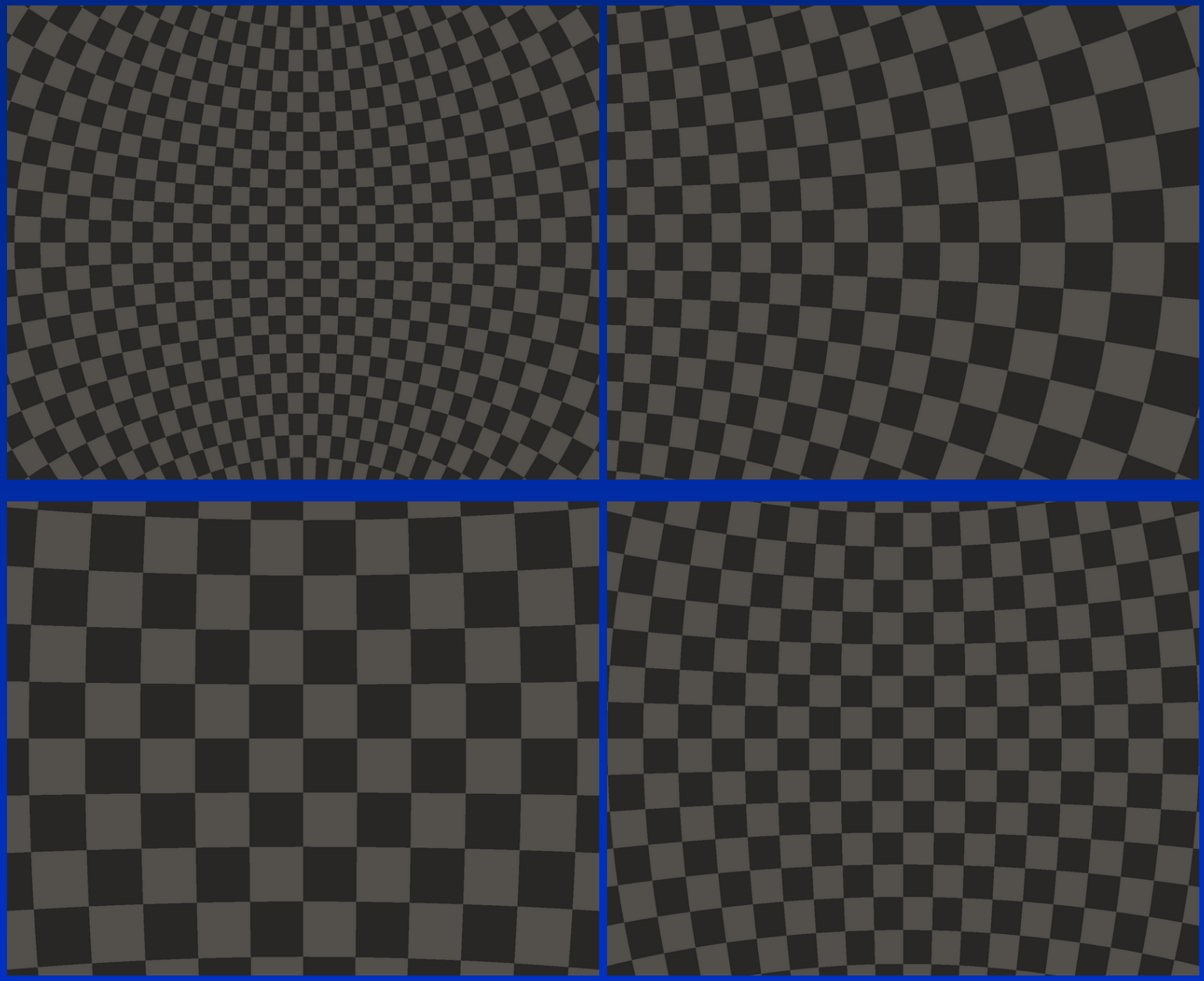
Intensité

- 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)

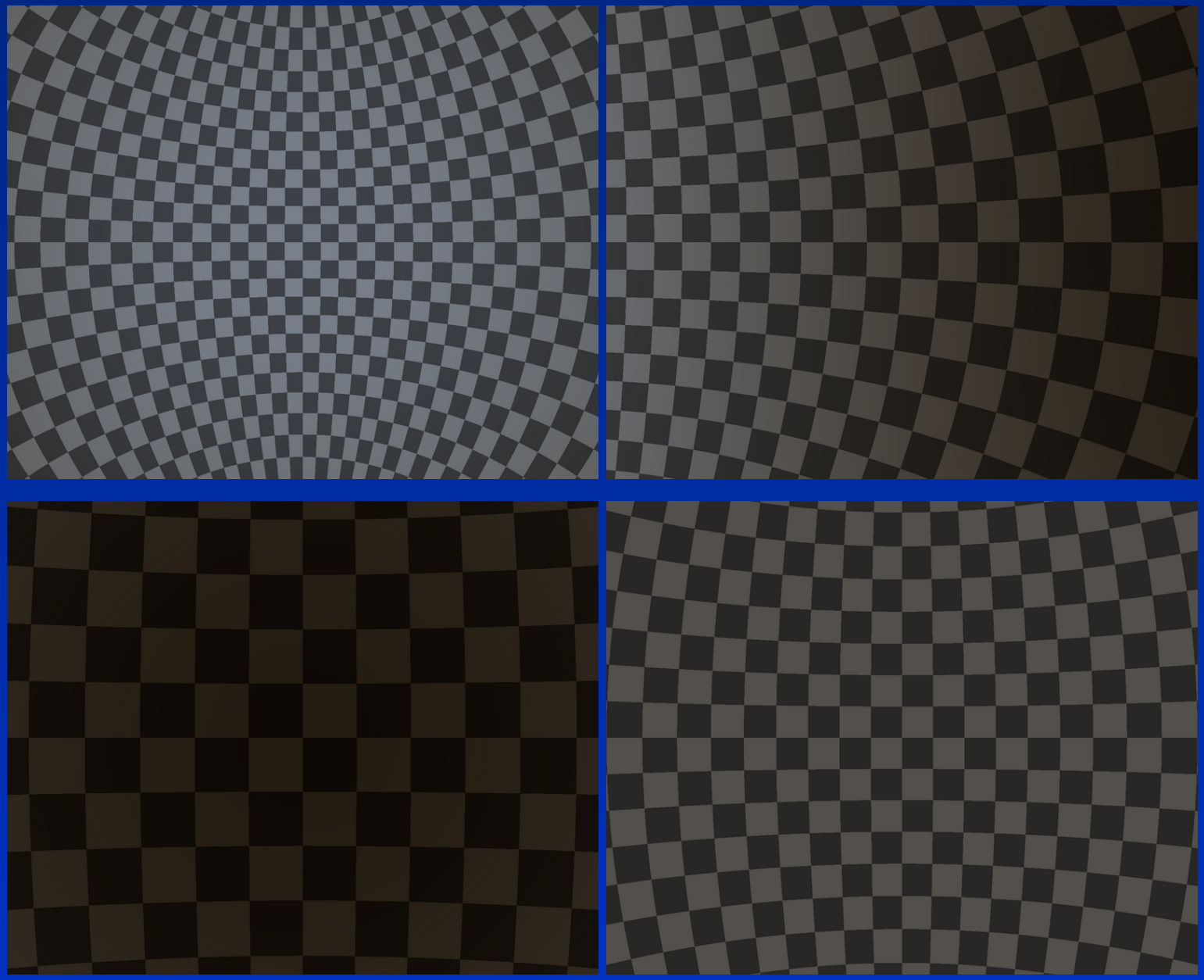


- $\longrightarrow$ On atténuera l'effet par la suite

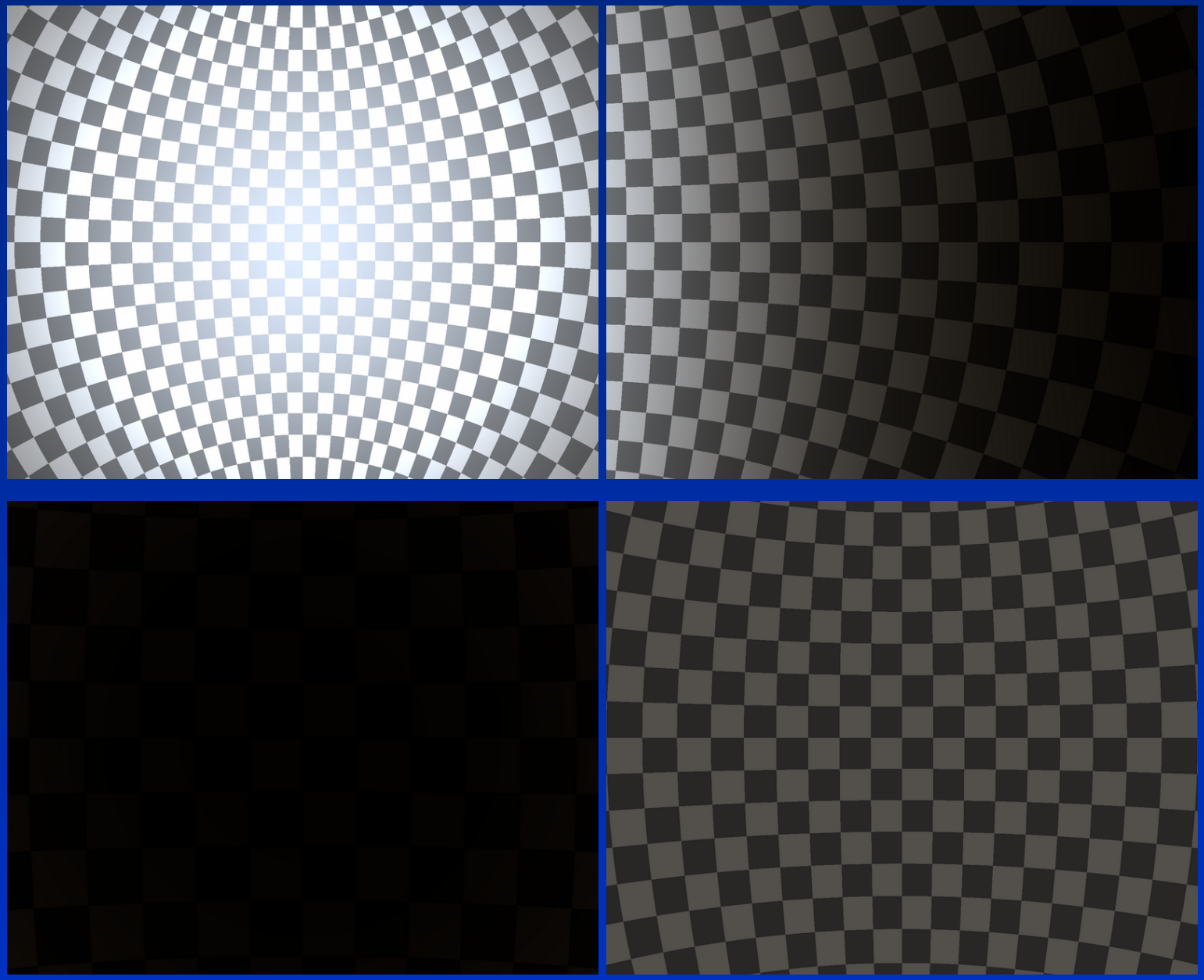
Exemples : $v = 50\%$ de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière aberration seule



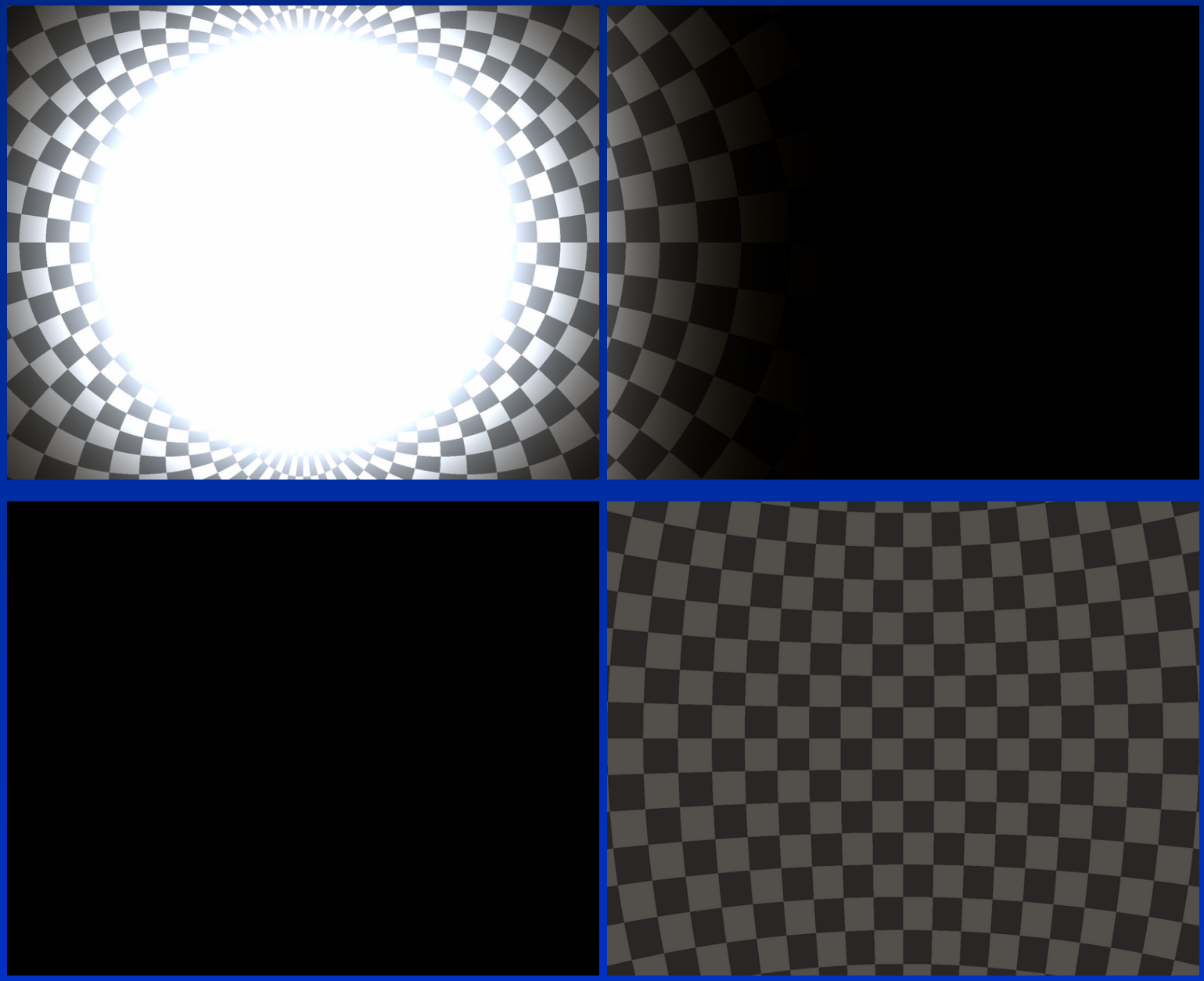
Exemples : $v = 50\%$ de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière aberration + Doppler



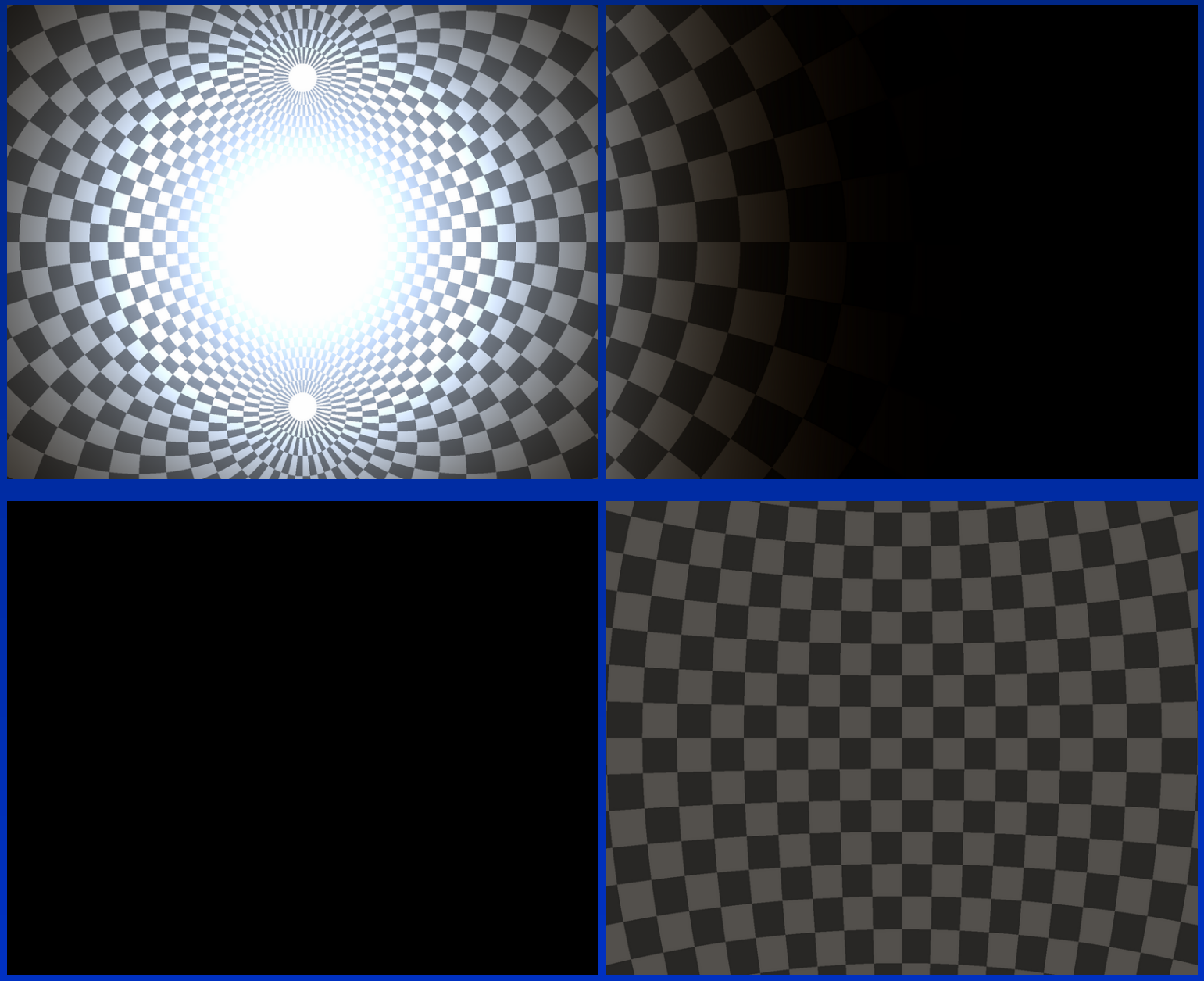
Exemples : $v = 50\%$ de la vitesse de la lumière, vues devant, droite, derrière aberration + Doppler + intensité



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 ϵ Eridani ?

- Passage de $v = 0$ à $v = 0.995c$ avec accélération a constante
- Durée de l'accélération $t = 3\ \mathrm{min}$, d'où

$$a \sim 500\ 000\ g$$

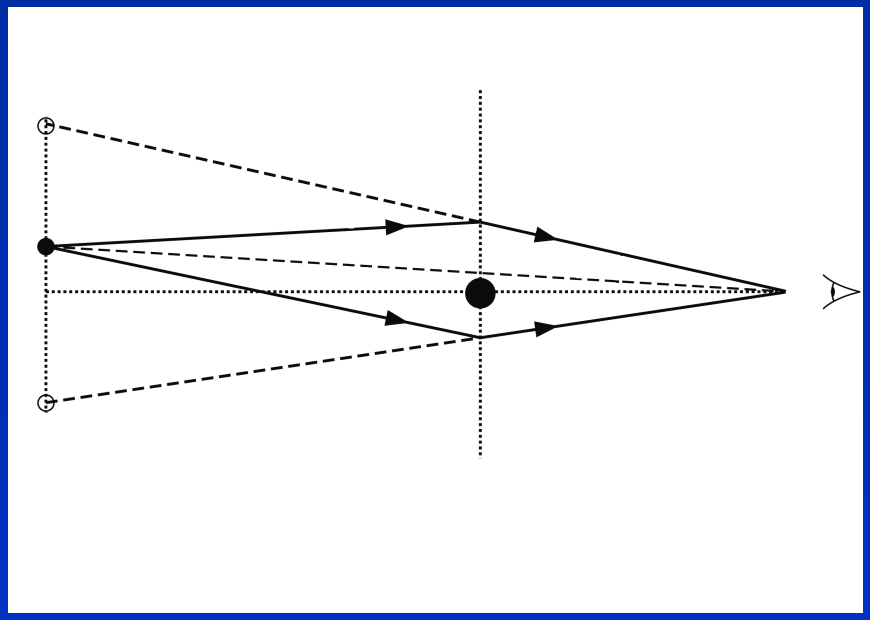
- À titre de comparaison :
  - Aéronautique : $a_{\mathrm{max}}^{\mathrm{cont}} \sim 10\ g$
  - Accidentologie sports mécaniques : $a_{\mathrm{max}}^{\mathrm{choc}} \sim 180\ g$, $\Delta l = 66\ \mathrm{cm}$, $\Delta v = 50\ \mathrm{m/s}$, $\Delta t \sim 0.025\ \mathrm{s}$ (D. Purley, Silverstone 1977)
- Accélération "réaliste" : 30 images/seconde $\longrightarrow$ 5 images/jour, $t \longrightarrow 3\ \mathrm{ans}$

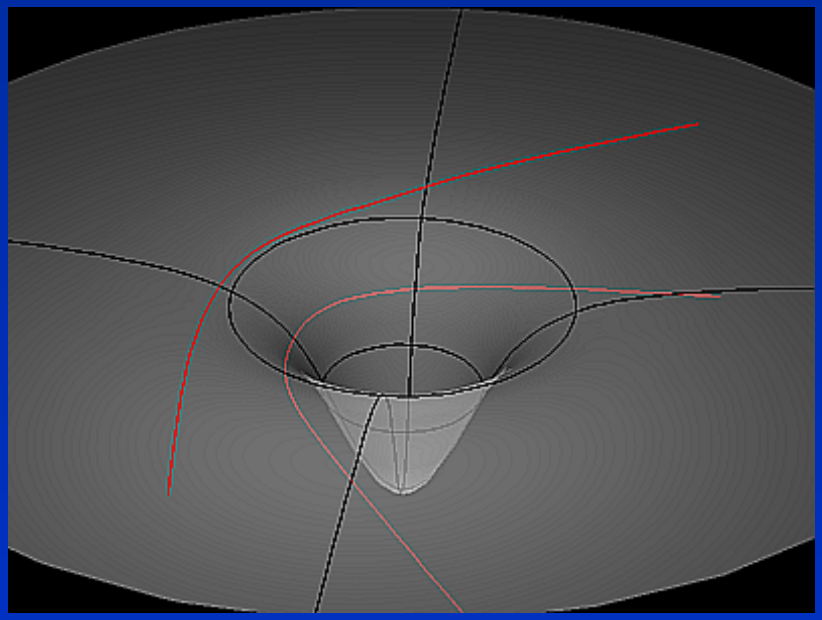
Les trous noirs (I)

- 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*)

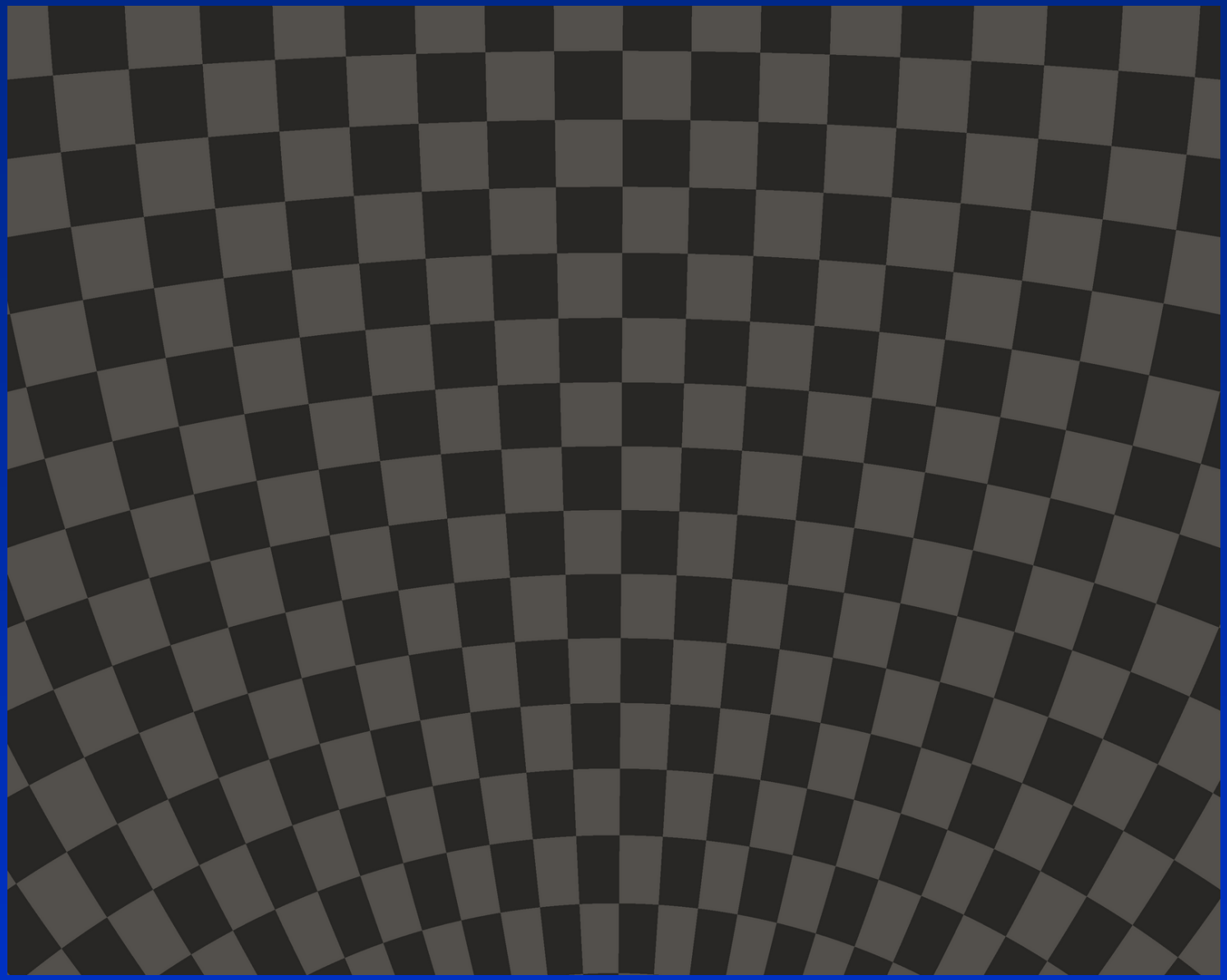
- Ils sont capable de modifier la trajectoire et l'énergie de la lumière





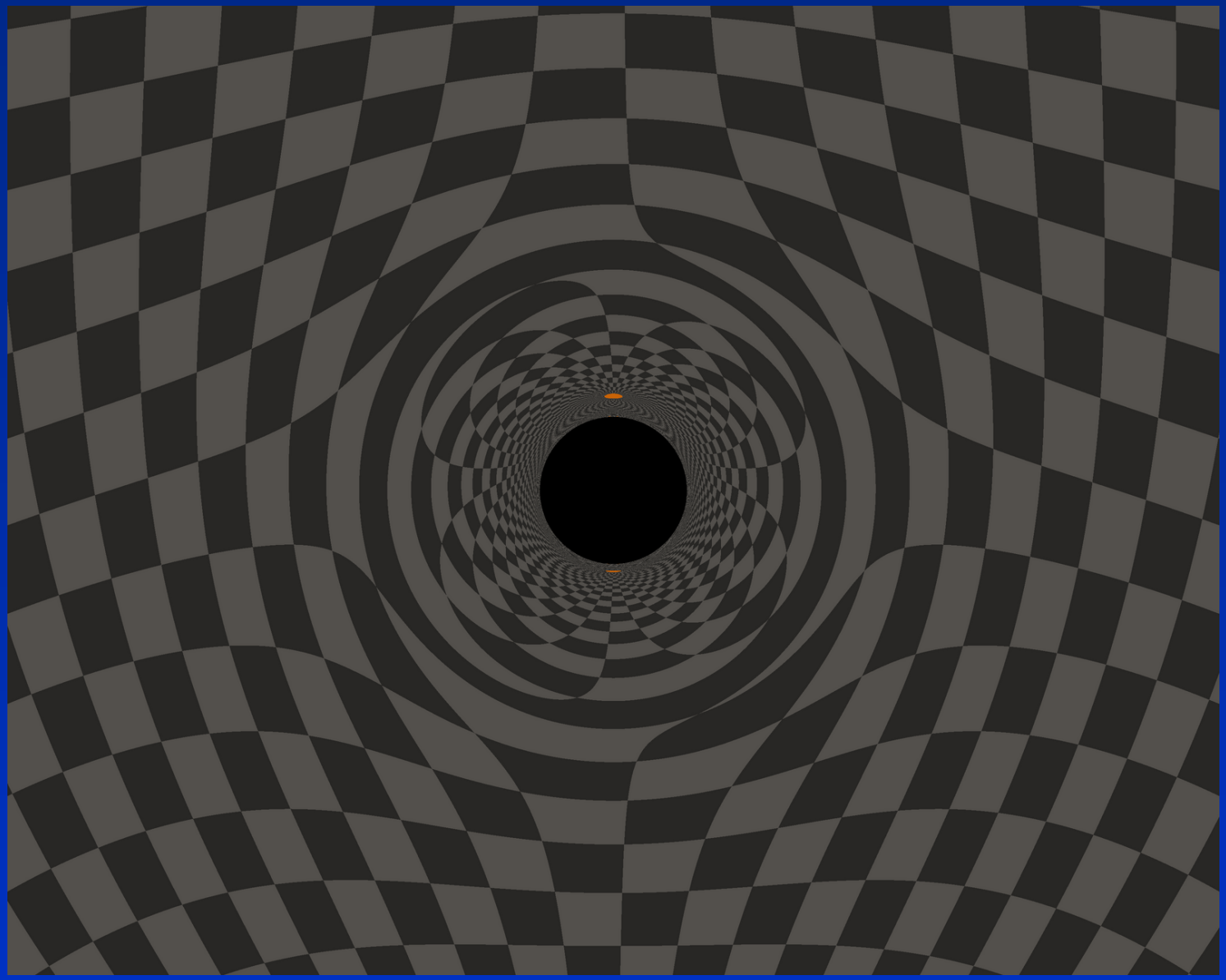
Effets gravitationnels sur la lumière (I)

Sans trou noir



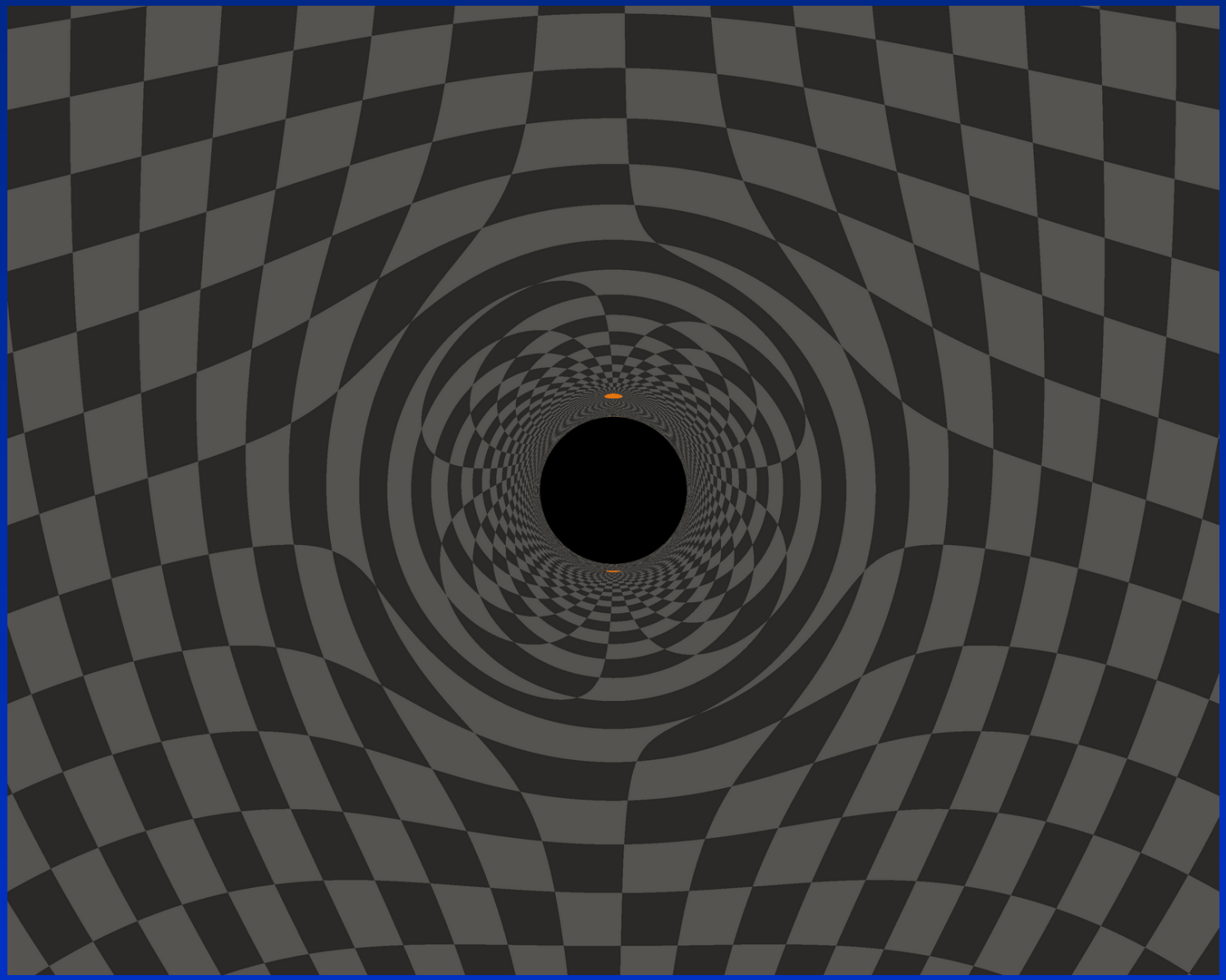
Effets gravitationnels sur la lumière (II)

Trou noir, déflexion seule



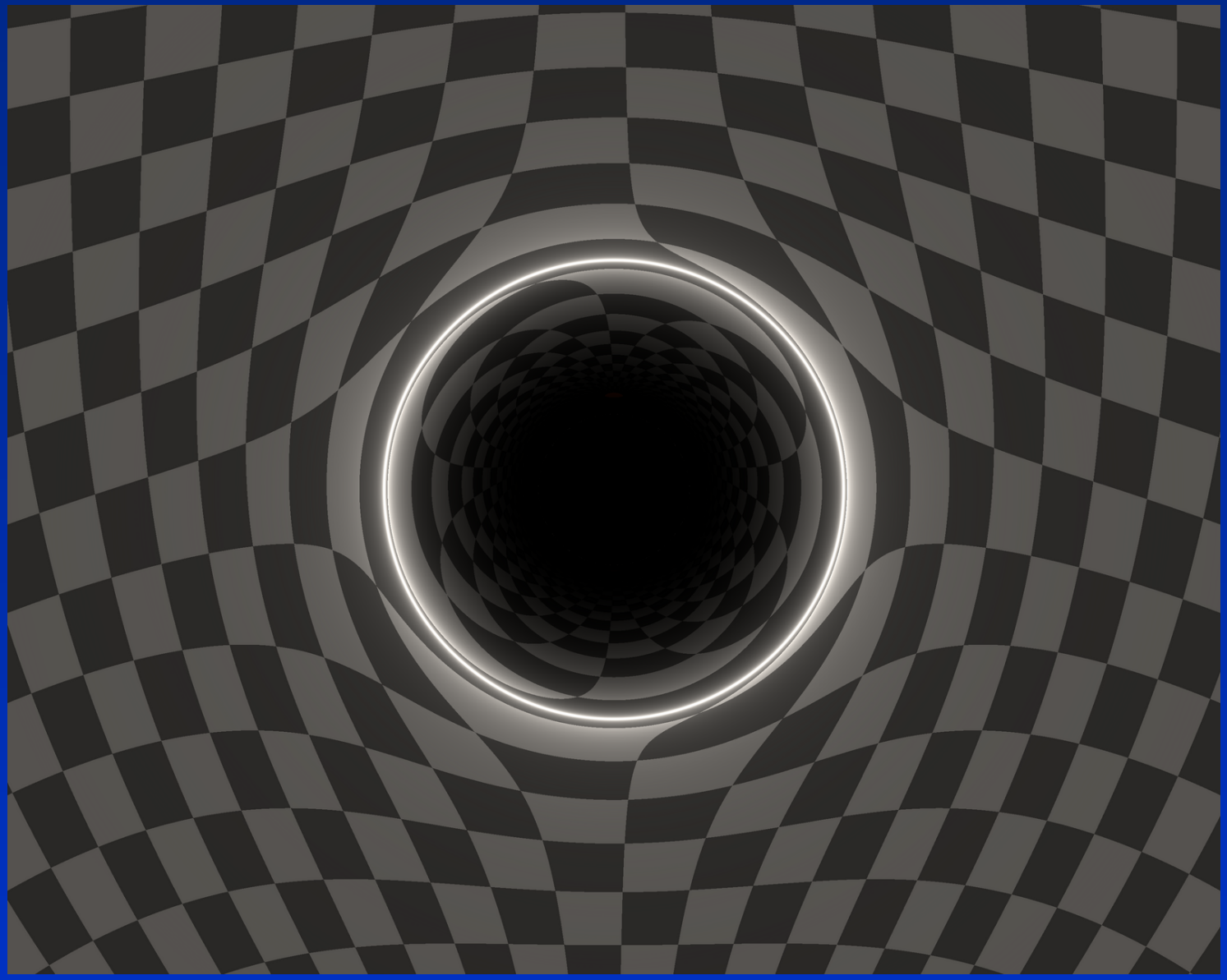
Effets gravitationnels sur la lumière (III)

Trou noir, déflexion + blueshift



Effets gravitationnels sur la lumière (IV)

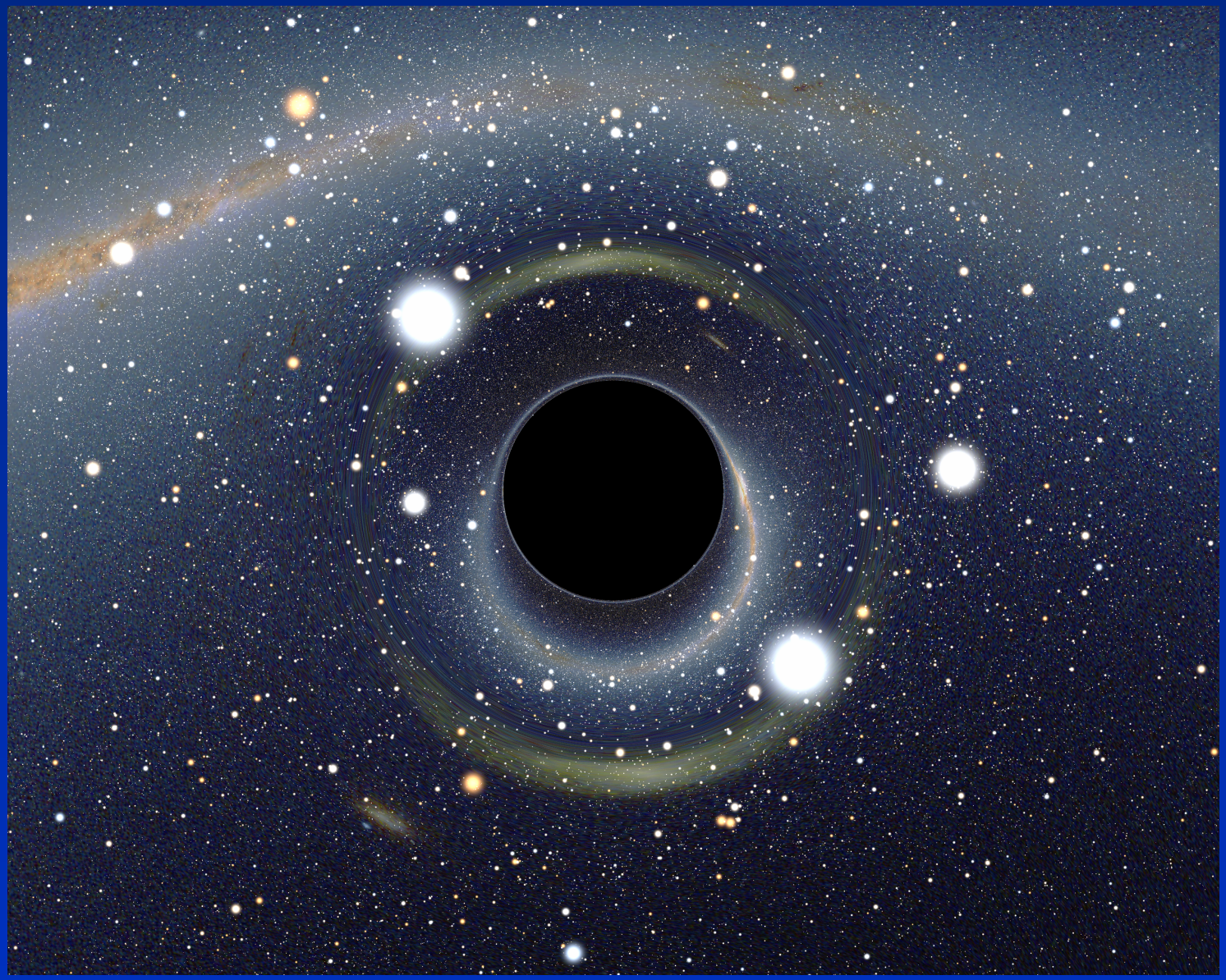
Trou noir, déflexion + blueshift + amplification



Les trous noirs (II)

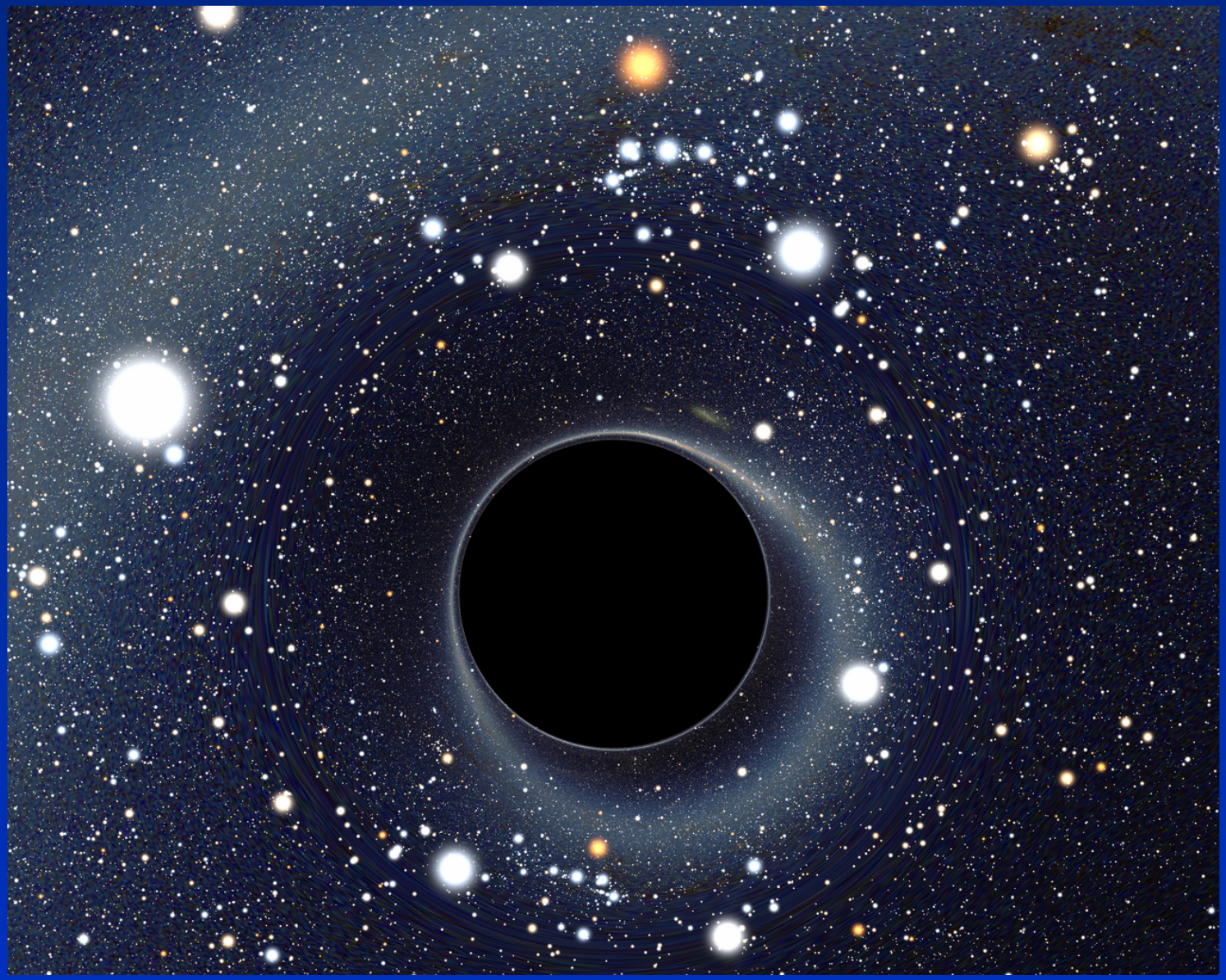
- Ils sont capable de modifier la trajectoire et l'énergie de la lumière
- La région située exactement derrière un trou noir n'est pas cachée par celui-ci mais apparaît sous la forme d'un anneau (l'anneau d'Einstein)
- La luminosité de cette région est considérablement amplifiée : c'est le phénomène 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...



Quand un trou noir déforme notre vision de l'univers...

Quand un trou noir déforme notre vision de l'univers...

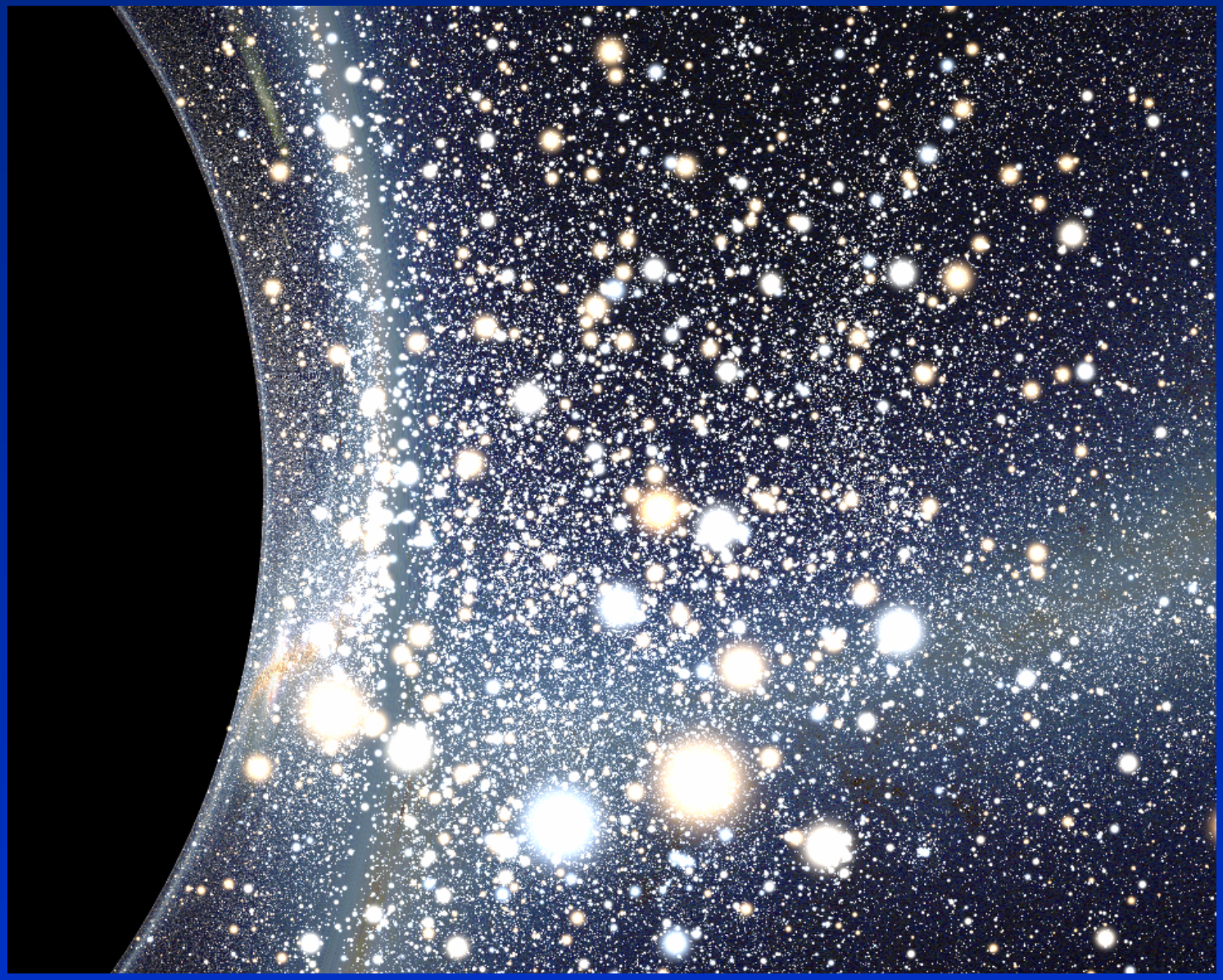


En orbite autour d'un trou noir

- Quelques exemples de trajectoires :
  - Circulaire "loin" du trou noir
  - Circulaire "près" du trou noir
  - "Elliptique"
  - "Parabolique"
  - "Hyperboliques"

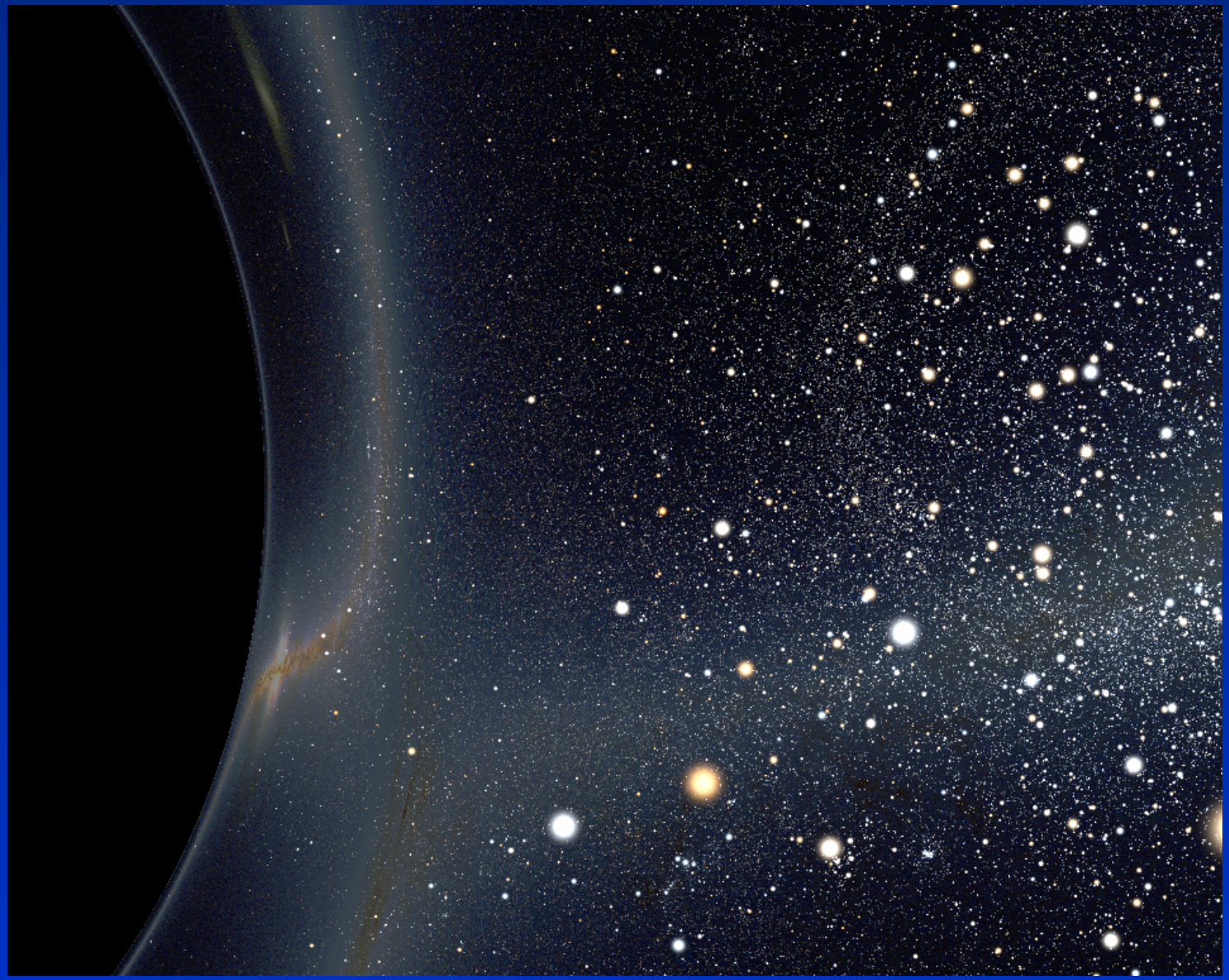
Jeu : Êtes-vous de bons astronomes relativistes ? (I)

Sauriez-vous reconnaître quelques constellations familières sur cette image ?

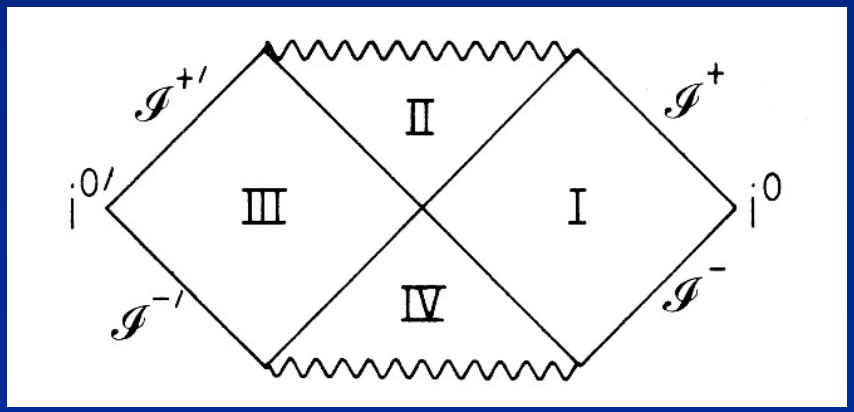


Jeu : Êtes-vous de bons astronomes relativistes ? (II)

Solution



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...

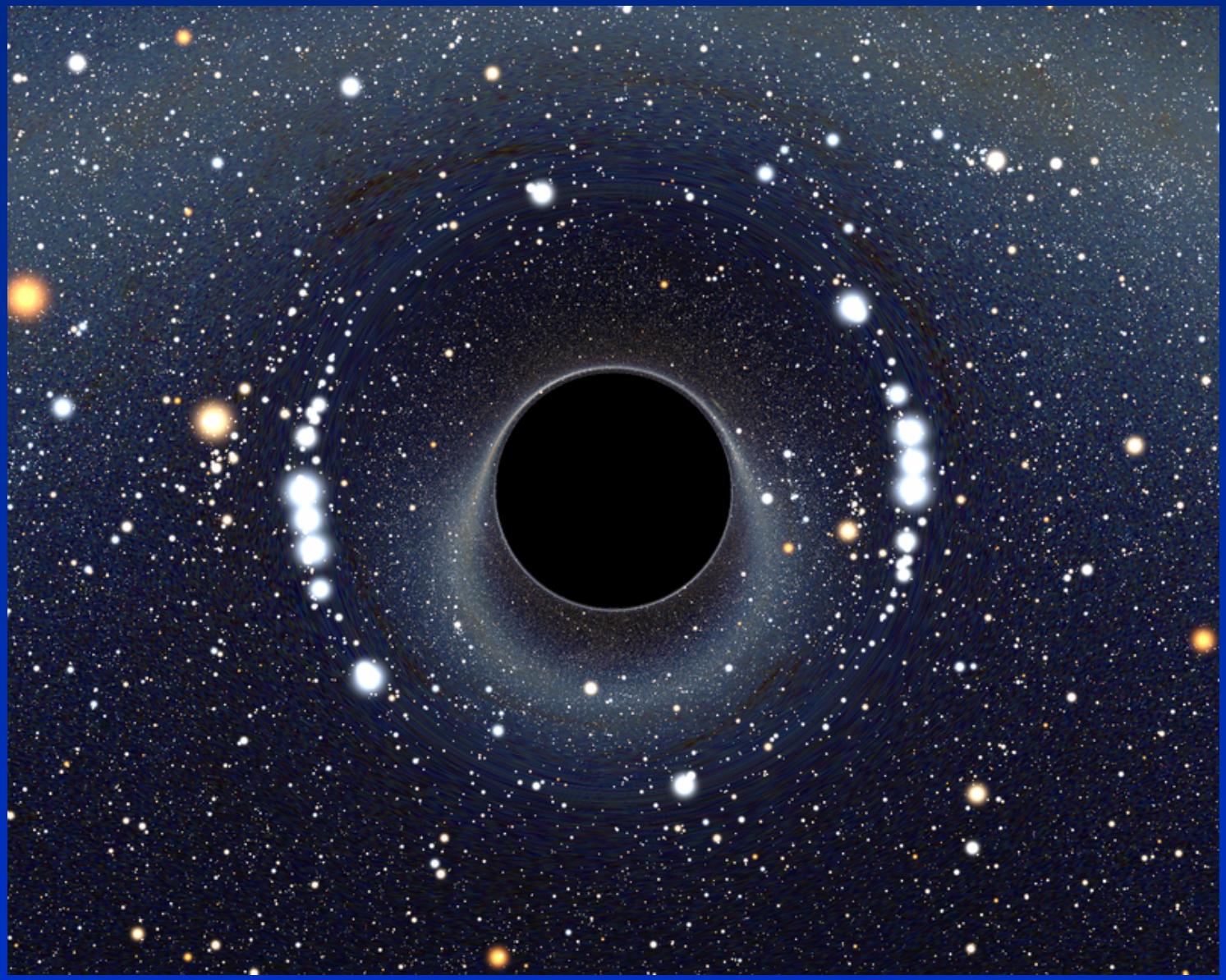
- Mais il existe d'autres solutions décrivant ces objets : les trous noirs éternels
  - La solution mathématique décrit en réalité deux régions (dites asymptotiques) reliées par le trou noir
  - Ces régions ne sont pas causalement reliées (= ne peuvent pas communiquer), mais visibles depuis l'intérieur de l'horizon
  - L'une ou l'autre ne peuvent être influencées par un observateur traversant l'horizon, mais sont visibles par lui
  - Quelques illustrations...

D'autres types de trous noirs

- Trous noirs dits de Reissner-Nordström, possèdent un champ électrique
- Ne correspondent pas à des situations astrophysiques réalistes
- ... mais possèdent des propriétés fascinantes :
  - Peuvent montrer une singularité nue (ne sont plus alors des trous noirs)
  - Peuvent connecter une infinité d'univers différents les uns aux autres, permettant à un observateur de passer sans dommages (???) de l'un à l'autre
- Quelques illustrations...

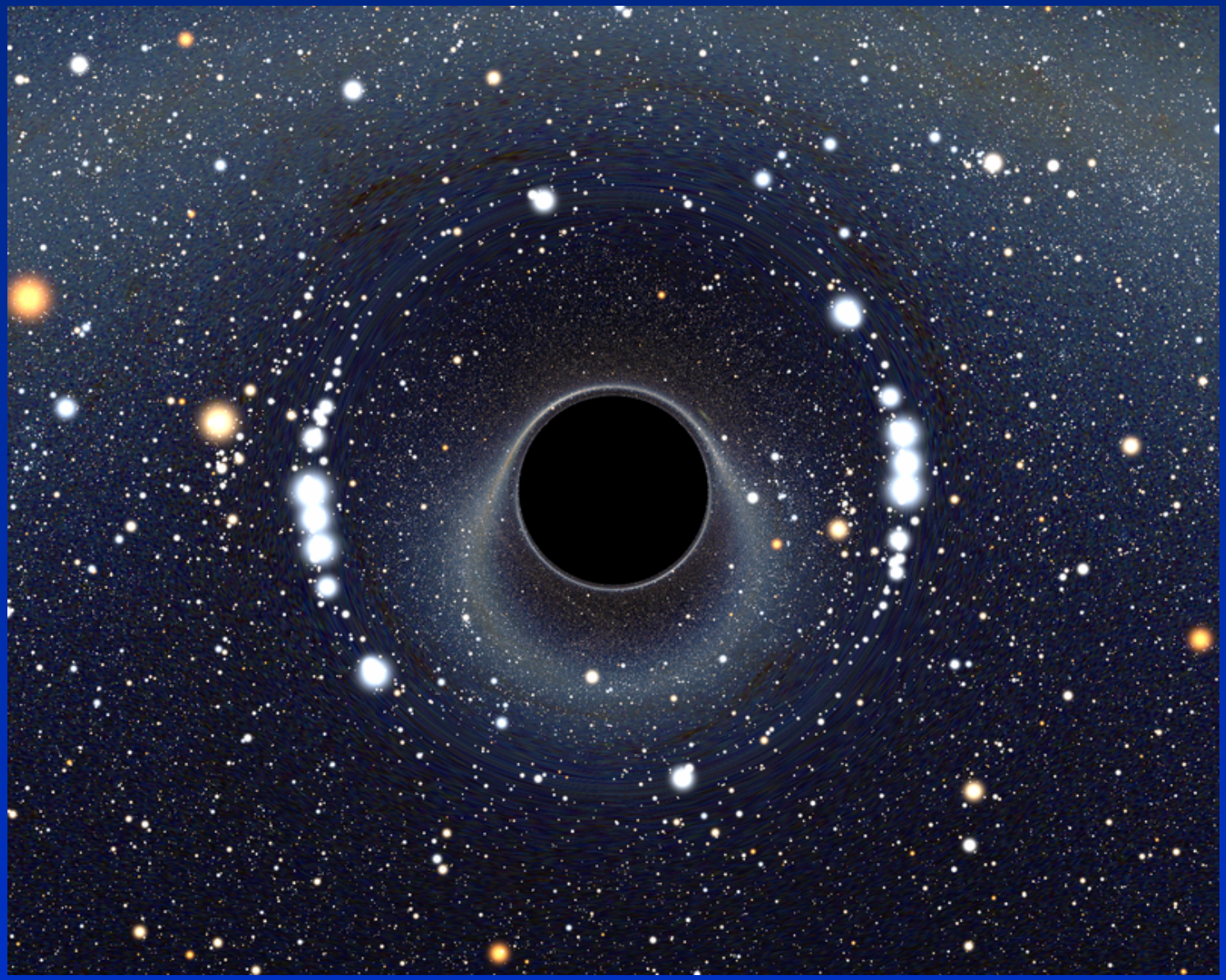
Hors l'horizon

Charge faible



Hors l'horizon

Charge juste inférieure à la charge critique

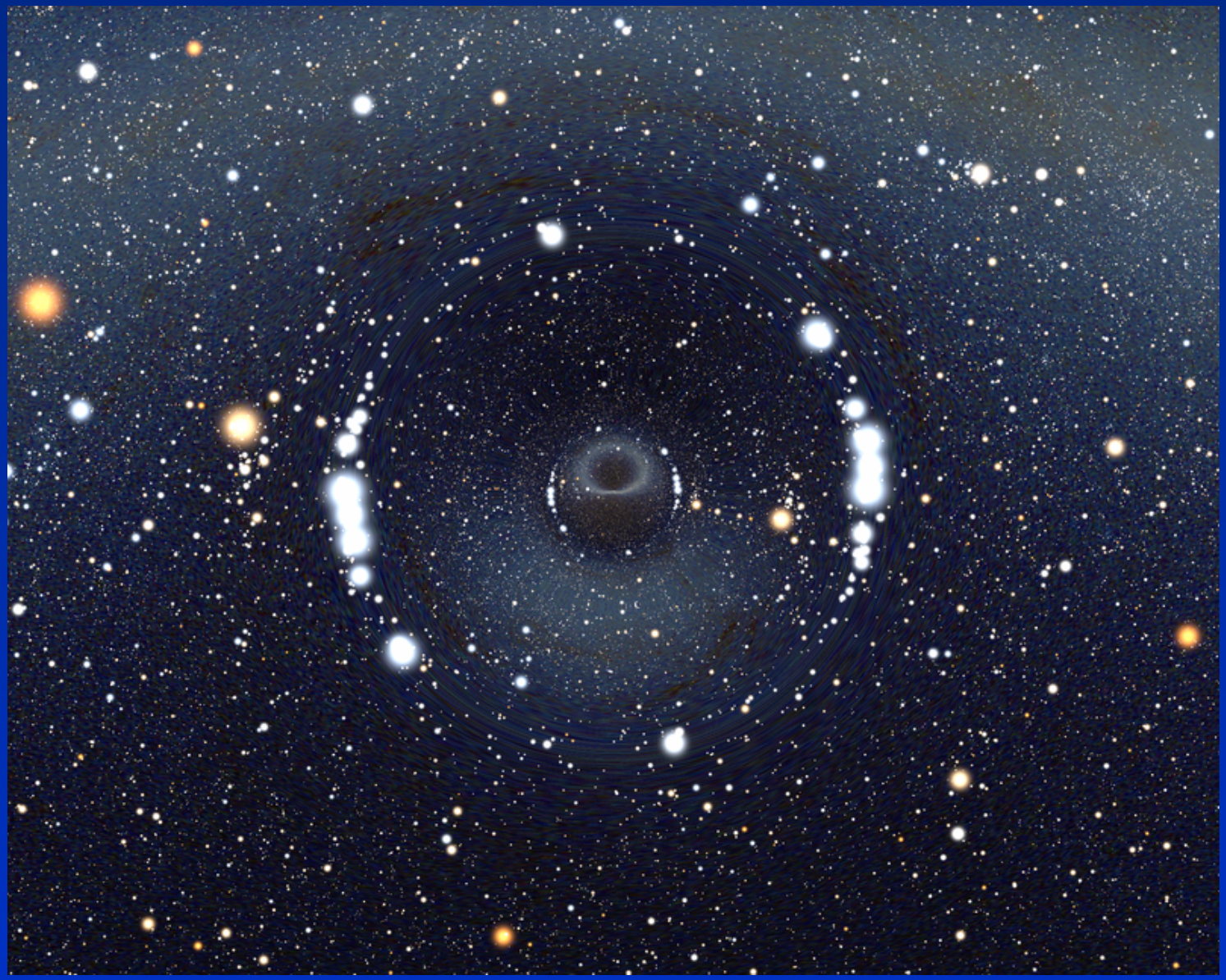


Singularité nue

Charge juste supérieure à la charge critique

Singularité nue

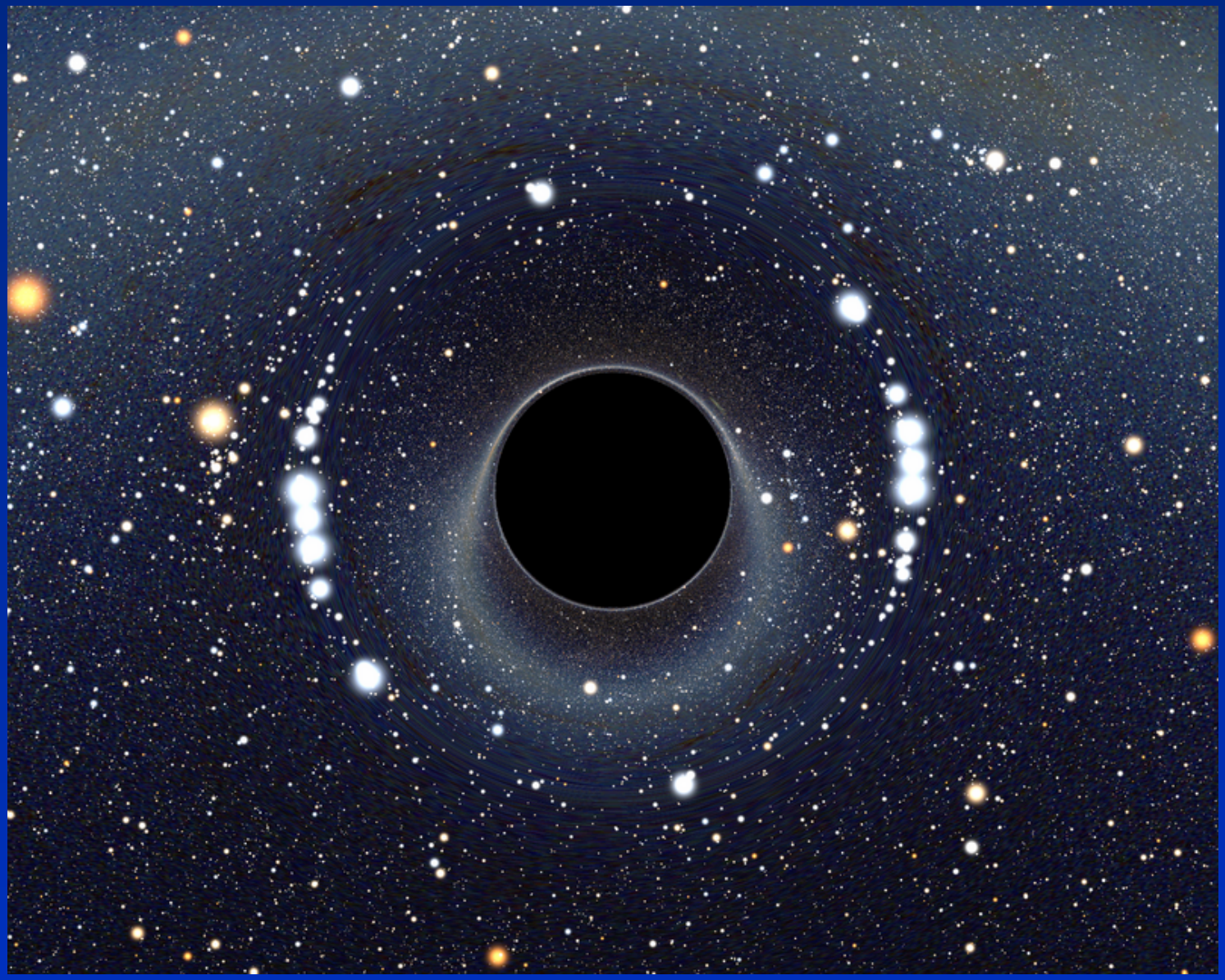
Charge élevée



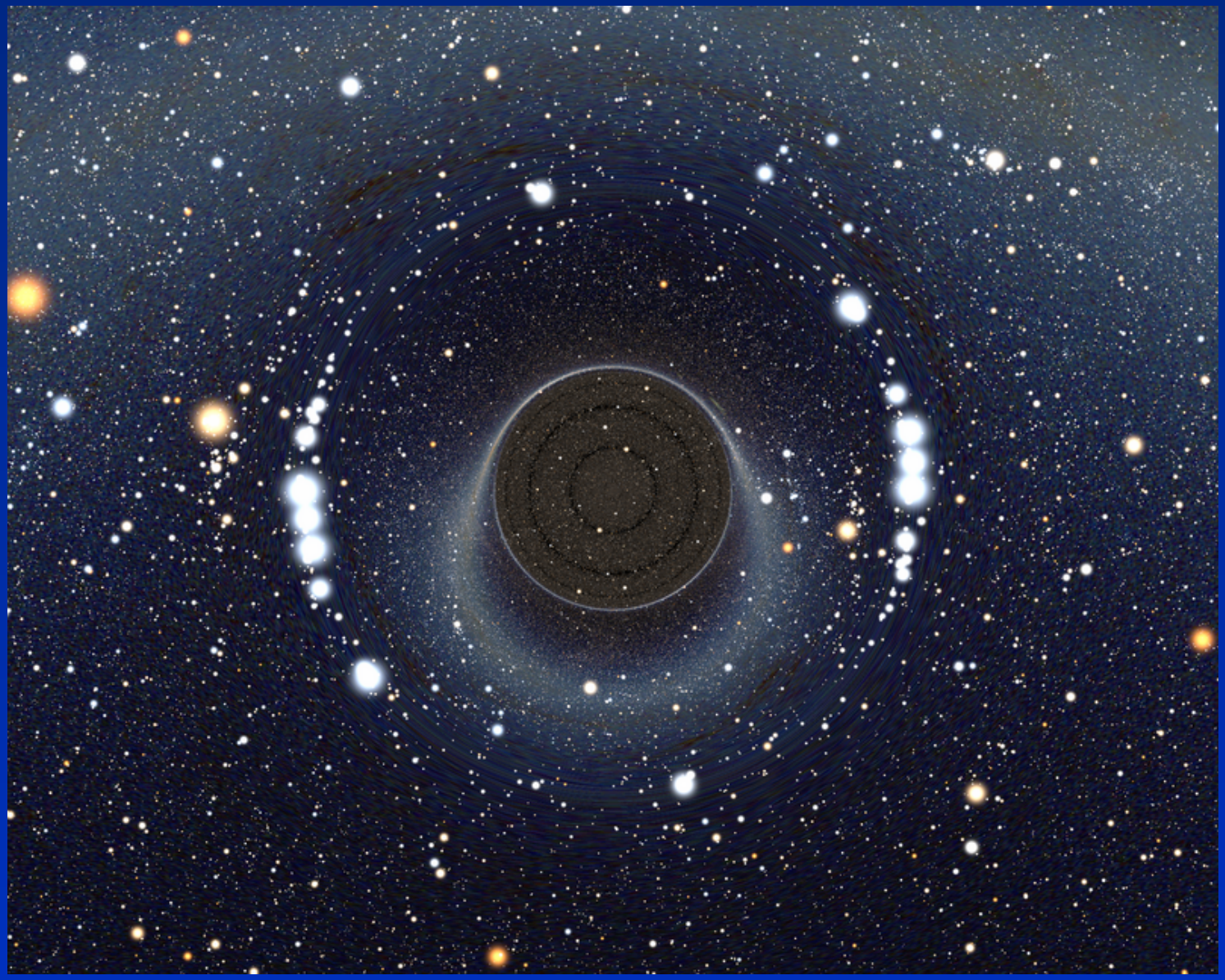
Singularité nue

Charge élevée, zoom

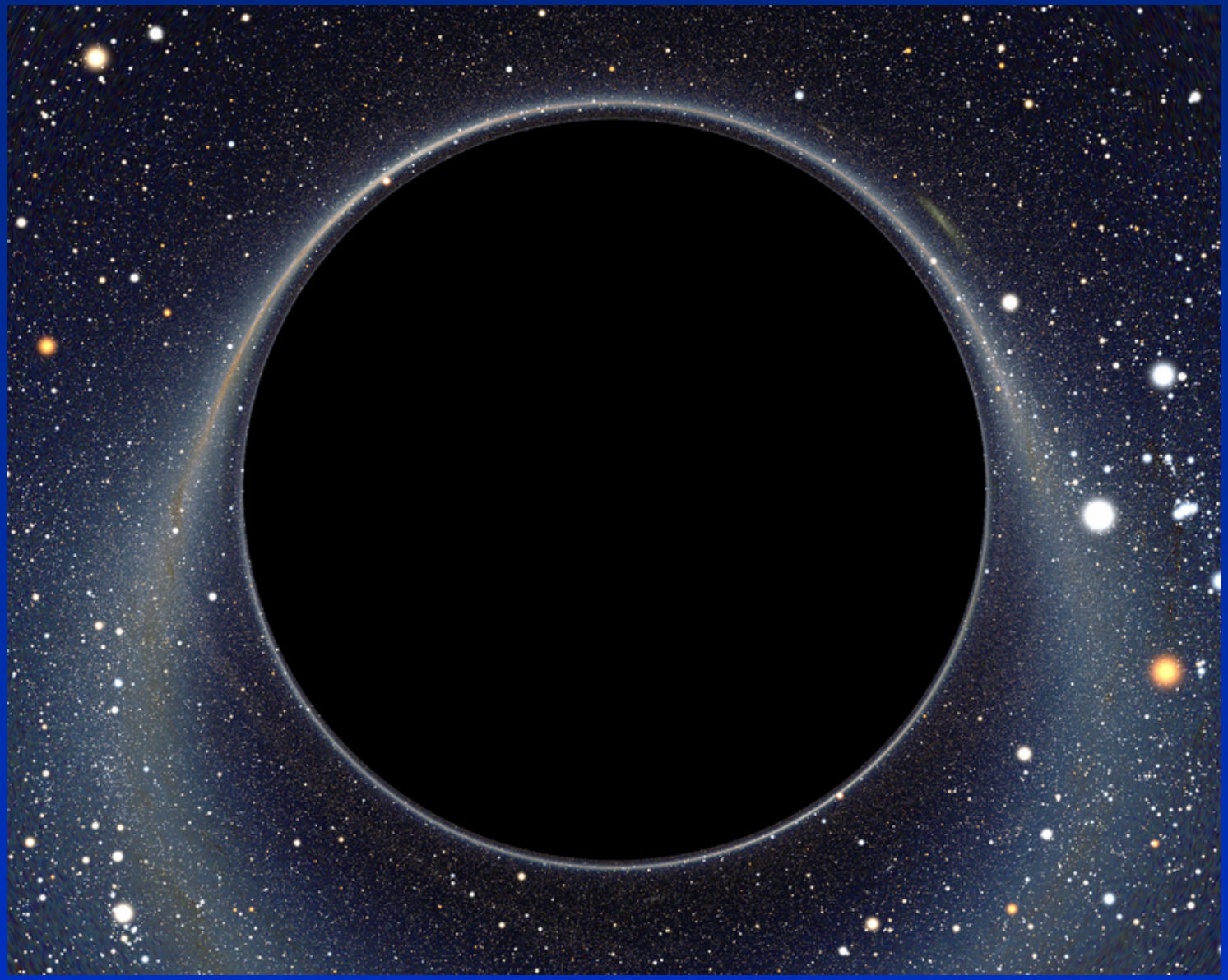
Pas de trou de ver



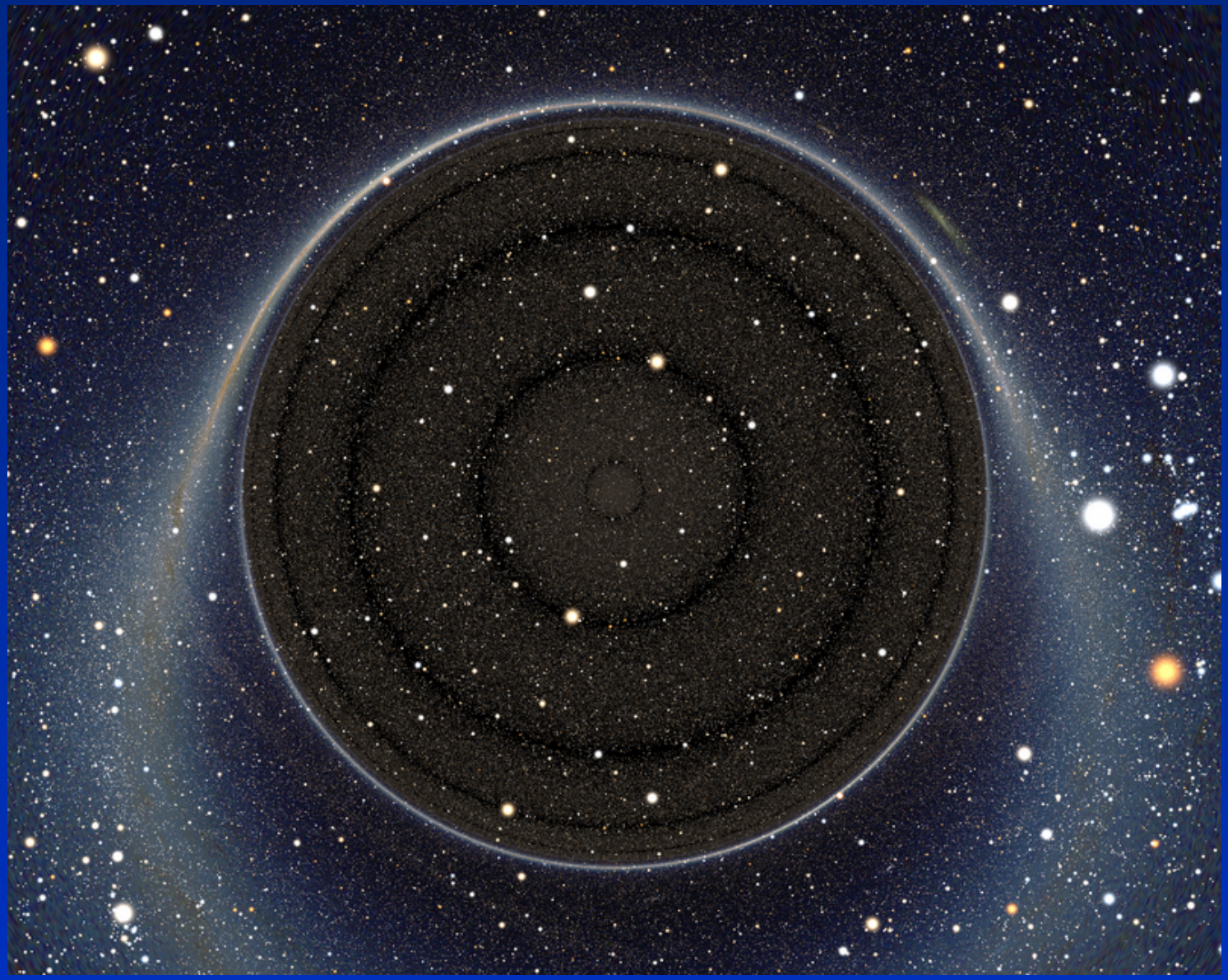
Avec trou de ver



Pas de trou de ver, zoom



Avec trou de ver, zoom



Conclusion

- Ça marche !
- Et c'est très différent de ce que montre la science fiction !